LES THÉORIES MODERNES

DE

L'ÉLECTRICITÉ

ESSAI D'UNE THÉORIE NOUVELLE,

PAR

O. LODGE,

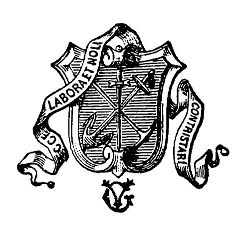
F. R. S., PROFESSEUR DE PHYSIQUE A L' « UNIVERSITY COLLEGE », DE LIVERPOOL.

TRADUIT DE L'ANGLAIS ET ANNOTÉ

PAR

E. MEYLAN,

Ingénieur civil, ancien Secrétaire de la Rédaction de la *Lumière électrique*.



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS ET FILS, IMPRIMEURS-LIBRAIRES

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1891

LES THÉORIES MODERNES

DE

L'ÉLECTRICITÉ.

PARIS — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS ET FILS,
55, quai des Grands-Augustins.

LES THÉORIES MODERNES

DE

L'ÉLECTRICITÉ

ESSAI D'UNE THÉORIE NOUVELLE,

PAR

O. LODGE,

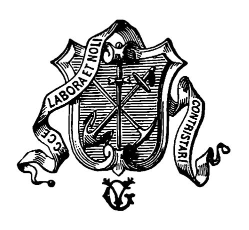
F. R. S., PROFESSEUR DE PHYSIQUE A L' « UNIVERSITY COLLEGE », DE LIVERPOOL.

TRADUIT DE L'ANGLAIS ET ANNOTÉ

PAR

E. MEYLAN,

Ingénieur civil, ancien Secrétaire de la Rédaction de la *Lumière électrique*.



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS ET FILS, IMPRIMEURS-LIBRAIRES

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

—

1891

PRÉFACE DU TRADUCTEUR.

Les pages qui suivent ont paru pour la première fois en 1887 et 1888 sous forme d'articles dans le journal anglais *The Nature;* elles ont été complétées et publiées en volume par l'Auteur, dans le courant de 1889, sous le titre de *Modern Views on Electricity*. Ce titre, dont il n'était pas facile de trouver l'équivalent en français, rend bien compte de ce qu'est l'Ouvrage, une suite d'aperçus dont l'enchaînement n'est pas toujours aisé à saisir.

Une idée, cependant, domine le tout et se dégage plus particulièrement à la fin du volume; tous les phénomènes électriques et magnétiques proviennent de modifications, de perturbations d'un milieu qui est en relation étroite avec l'éther luminifère.

Sans doute, cette conception n'est pas nouvelle; sans remonter bien loin, nous rappellerons qu'un savant enlevé depuis peu à la Science, M. Edlund a toujours professé l'identité de l'éther et de l'Électricité.

Cette théorie trop simpliste n'a guère cependant été étendue qu'à certaine classe de phénomènes, et n'est au fond qu'une forme de l'analogie hydraulique que l'on retrouve dans une foule d'ouvrages élémentaires.

La théorie de M. Lodge, moins simple, est beaucoup plus complète et embrasse l'ensemble de tous les phénomènes de

l'Électricité et du Magnétisme. Elle est basée sur une conception dualistique de l'éther, et conforme en cela aux idées de Faraday, de Maxwell et de sir W. Thomson, elle rejette au second plan les phénomènes de charge de courants et de pôles magnétiques, pour s'attacher surtout au milieu qui est le véritable siège des forces ou qui les transmet.

Sans doute les représentions de ce milieu sont bien grossières et les premiers *modèles mécaniques* de M. Lodge feront peut-être sourire le lecteur français, peu habitué à de semblables conceptions.

Il convient de lire entre les lignes et de ne pas attribuer à ces grossiers symboles plus de valeur qu'ils n'en comportent.

Ce ne sont que des formes transitoires qui, ainsi que l'Auteur le dit dans sa Préface, doivent aboutir à la conception d'un milieu dont l'état de mouvement, les liaisons ou la structure soient tels qu'il puisse subir et transmettre les modifications permanentes ou temporaires, caractéristiques des divers phénomènes électriques et magnétiques.

Des essais partiels ont été tentés à plusieurs reprises par les savants anglais qui paraissent avoir la spécialité des recherches de cet ordre. Jusqu'ici ils n'ont guère abouti qu'à la combinaison de mécanismes tellement artificiels qu'il est difficile d'y voir une image de la réalité; aussi le plus connu de ces essais, celui de Maxwell, paraît-il avoir été abandonné par son Auteur.

Dans un Ouvrage récent, consacré à l'étude des théories de l'illustre savant, M. Poincaré (1) a montré qu'il était illusoire d'espérer connaître jamais la nature réelle de ce milieu, car, dès que l'on aura trouvé une solution, on pourra en imaginer une infinité d'autres qui satisferont aussi bien aux conditions mécaniques.

(1) *Électricité et Optique.*

Cela ne veut pas dire qu'il faille renoncer à ces recherches, car il est bien certain qu'une solution un peu générale serait un puissant moyen d'investigation et permettrait de soupçonner l'existence de phénomènes encore inconnus, comme on en a vu des exemples éclatants avec la théorie mécanique de la chaleur et la théorie cinétique des gaz.

Nous n'en sommes pas encore là; cependant ces spéculations ont conduit l'Auteur à de brillantes découvertes, car l'on ne doit pas oublier que M. Lodge n'a été devancé que de bien peu par la publication du premier Mémoire de M. Hertz.

Le livre de M. Lodge est élémentaire, en ce sens qu'il cherche à parler à l'imagination et aux yeux par des symboles matériels, au lieu d'établir les équations des phénomènes. Est-ce à dire qu'il faille le mettre entre les mains des commençants? Nullement, car il suppose déjà une connaissance assez complète des faits. Doit-il alors jouer un rôle dans l'enseignement supérieur, comme l'Auteur le dit dans sa Préface. Nous ne le pensons pas non plus. Si nous jugeons à propos de le présenter au public scientifique français, ce n'est pas en vue d'une classe spéciale de lecteurs, mais pour faire profiter d'une œuvre éminemment suggestive tous ceux qui s'intéressent à cette partie de la Physique, sans en posséder la quintessence.

Nous avons cherché à conserver autant que possible à notre traduction ce caractère humoristique cher à quelques savants d'outre-Manche et, pour en faciliter la lecture, nous y avons ajouté quelques notes dans l'intention de suppléer à ce que le texte a parfois de trop sommaire, et pour rectifier de légères inexactitudes de détails.

EUGÈNE MEYLAN.

Paris, décembre 1890.

PRÉFACE DE L'AUTEUR.

La doctrine exposée dans cet Ouvrage est la théorie éthérique de l'Électricité. Comme on peut dire que la chaleur est une forme de l'énergie, ou un mode de mouvement, ainsi on peut considérer l'Électricité comme une forme de l'éther ou comme un de ses modes de manifestation.

Cette idée est amenée graduellement, aussi les explications de la Première Partie n'ont-elles pas été poussées aussi avant dans le détail que celles des Troisième et Quatrième Parties. Cet Ouvrage étant destiné aux élèves de l'enseignement supérieur, il semblait permis d'adopter une méthode que j'ai toujours suivie et qui consiste à donner d'abord une idée *approchée* et de la développer ensuite progressivement; on évite ainsi le risque de surmener l'élève et de brouiller toutes ses idées en essayant de lui faire saisir *ab initio* une conception nouvelle avec toutes ses conséquences.

A cause même de cette disposition, il conviendra de parcourir cet Ouvrage, avant de chercher à approfondir les théories qui y sont exposées.

Les personnes qui s'occupent d'autres parties de la Science, de Philosophie et de Littérature et qui ne sont, par suite, pas au courant de la Physique, seront peut-être surprises de voir de quelle manière familière les physiciens parlent aujourd'hui de l'éther et de l'assurance avec laquelle on le soumet à l'ex-

périence. Peut-être inclinent-elles à croire que c'est encore quelque milieu hypothétique dont l'existence est affaire d'opinion. Tel n'est pas le cas. L'existence de l'éther peut être légitimement niée, comme on peut nier celle de la matière, mais seulement à ce point de vue particulier.

L'existence de l'éther s'impose d'une manière aussi forte et aussi directe que celle de l'air; l'œil, qui nous permet d'avoir connaissance de l'éther, est aussi parfait que l'oreille, qui nous prouve l'existence de l'air, bien que leurs sensations soient moins frappantes que celles de la main, notre organe de la matière. L'évidence des indications qu'ils fournissent doit être admise ou révoquée en doute pour l'un comme pour l'autre.

Quelques-unes des explications que j'ai fournies peuvent être fausses (j'espère qu'il n'en est rien), et certainement elles devront toutes être plus ou moins amendées; mais, quant à la doctrine principale de la nature de l'Électricité, c'est pour moi plus qu'une vue, c'est une conviction.

Il y a peu de choses dans toute la Physique qui paraissent plus certaines que celle-ci, que ce qu'on a longtemps appelé Électricité est une forme ou mieux une manifestation de l'éther.

Les termes *électrification*, *électrique* peuvent subsister, le mot *Électricité* doit disparaître peu à peu. On remarquera du reste que, tandis qu'il revient fréquemment dans la Première Partie de ce livre, alors qu'on parle rarement de l'éther, c'est l'inverse à la fin du volume.

Une formule grossière adaptée à l'entendement populaire, c'est que l'Électricité et l'éther sont identiques; mais elle n'est pas complète, car il y a deux sortes d'Électricité et il n'y a pas deux éthers. Il peut y avoir deux aspects de l'éther, comme une feuille de papier a deux côtés, ainsi les Électricités positive et négative peuvent n'être que deux aspects, ou,

comme je l'ai dit par une analogie chimique, deux *éléments* de l'éther.

Toute chose qui peut être soumise à un effort de cisaillement (et l'éther est cisaillé par la force électromotrice) doit consister en deux éléments suffisamment différents pour être déplacés en sens inverse.

Si cette donnée est vague, c'est que notre connaissance actuelle de la structure de l'éther est vague, mais non que la relation de l'Électricité à l'éther soit incertaine ou sera plus exactement définie quand nous connaîtrons mieux la constitution de l'éther.

Ce que nous devons maintenant examiner, ce n'est pas la nature de l'Électricité, c'est celle de l'éther. Les explications surgissent toujours progressivement, aucune n'est définitive; chacune d'elles n'est que le passage d'une catégorie inférieure à une catégorie supérieure. Ainsi, il fut un temps où les comètes étaient tout ce qu'on voulait, on a montré que c'était une forme de météorites. Les météorites, de leur côté, ont été reconnues être des particules de matière ordinaire, du fer, etc. Reste alors la question : Qu'est-ce que le fer, ou toute autre matière?

La chaleur a été prise d'abord pour une forme de la matière; on sait maintenant que c'est une forme de l'énergie, mais qu'est-ce que l'énergie? L'Électricité a également passé pour une forme de l'énergie, mais on a montré que c'était une forme de l'éther.

Il reste donc à voir ce que c'est que l'éther? Et c'est bien la question actuelle, *la question du monde physique*. Elle n'est pas insoluble; d'après l'Auteur, elle serait même bien près d'être résolue et elle est probablement plus simple que celle qui devra être abordée immédiatement après : Qu'est-ce que la matière?

Elle est plus simple en partie parce que l'éther est un, tandis que la matière est ou paraît multiple; en partie, parce que le voisinage de la matière modifie tellement l'éther qu'aucune théorie complète des propriétés de la matière ne peut être établie avant que nous n'ayons une connaissance préliminaire des propriétés etde la constitution de l'éther libre. Quand il en sera ainsi, on pourra comprendre l'effet résultant que nous appelons matière.

Si l'on pouvait concevoir un fluide parfait, continu, incompressible, occupant tout l'espace, et qui, par ses divers modes de mouvement remplît toutes les fonctions de l'éther; si ce milieu pouvait en particulier transmettre la lumière et manifester les phénomènes électriques et magnétiques qui ne dépendent pas de la présence de la matière, et si l'état de mouvement ainsi imaginé était possible et stable, la théorie de l'éther libre serait établie.

Une conception de ce genre a été indiquée dernièrement dans une lettre au journal anglais *Nature* par G.-F. Fitzgerald (10 mai 1889), qui a montré qu'un fluide dont la seule structure provient d'un mouvement tourbillonnaire ou vorticiel consistant en un entrelacement d'éléments de *vortex*, est capable de remplir toutes les fonctions de l'éther libre; il y a de bonnes raisons de croire que ce mode de mouvement est stable et possible [1]. S'il ne se présente aucune objection, si

---

[1] L'éther du Prof. Fitzgerald pourrait consister, par exemple, en un assemblage de *vortex* entrelacés les uns dans les autres suivant les trois directions principales; les *vortex* adjacents tournant en sens inverse, comme les cellules de nos diagrammes *fig.* 37 et 46, dans lesquels les tourbillons positifs (dans le sens des aiguilles d'une montre) représentent l'Électricité positive et les tourbillons négatifs l'Électricité négative. Tant qu'on n'en vient pas aux relations avec la matière, il ne peut y avoir pour les éléments de l'éther ou les deux Électricités qu'une opposition pure et simple des propriétés.

cet essai peut supporter toutes les critiques, la théorie de l'éther libre est fondée.

La théorie de l'éther entraîné et de la matière pourra suivre et il faudra alors expliquer, à côté des phénomènes optiques et électriques, la cohésion et la gravitation. Alors, on pourra attaquer la question des différences spécifiques entre les éléments et la nature de ce que nous appelons les *combinaisons*. Une fois cela fait, la Chimie entière sera ramenée à une loi simple.

Espérons que, dans un demi-siècle d'ici, ces immenses progrès seront réalisés.

University College, Liverpool, 13 mai 1889.

LES THÉORIES MODERNES

DE

L'ÉLECTRICITÉ.

PREMIÈRE PARTIE.

INTRODUCTION ET ÉLECTROSTATIQUE.

CHAPITRE I.

NOTIONS FONDAMENTALES.

1. On a souvent prétendu que nous ignorions complètement la nature intime de l'Électricité, et il y a sans doute quelque chose de vrai dans cette proposition pessimiste; cependant cela n'est pas tout à fait aussi juste aujourd'hui qu'il y a quinze ou vingt ans. Nous commençons à avoir certaines données sur cette question; aussi, bien qu'on ne puisse faire que des essais de théorie, qui nécessiteront sans doute des modifications ultérieures, nous sommes indubitablement en bonne voie de progrès.

Mon but, dans ces quelques pages, est d'essayer de faire comprendre quelles sont les vues actuelles des physiciens sur les questions qui se rattachent à l'Électricité.

Les phénomènes électriques peuvent être classés en quatre grandes subdivisions :

1° L'Électricité en équilibre ou *Électricité statique*; sous

ce chef nous étudions tous les phénomènes de tensions ou de polarisation produits dans des corps isolants ou diélectriques par le voisinage de charges électriques ou de corps électrisés au repos, la manière de produire ces charges électriques et les lois de leurs actions réciproques.

2° L'Électricité en mouvement, l'*Électrodynamique* ou le *Galvanisme*, comprend la discussion des effets produits par le passage de l'Électricité dans les conducteurs métalliques, les composés chimiques et les diélectriques, ainsi que l'étude des causes qui produisent ce mouvement continu et ses lois.

3° L'Électricité en rotation ou le *Magnétisme;* sous ce titre nous rangeons les phénomènes produits par l'Électricité soumise à un mouvement tourbillonnaire (*vortex*), les causes qui le produisent, les tensions des milieux qui en sont le siège, et les lois des actions réciproques de ces tourbillons.

4° L'Électricité en vibration, ou *radiation*, comprend l'étude de la propagation des perturbations périodiques ou ondulatoires à travers les diverses sortes de milieux, les lois qui régissent la vitesse de propagation des ondes engendrées, leur longueur d'onde, la réflexion, les interférences, la dispersion, la polarisation et une foule d'effets connus depuis longtemps sous le nom de phénomènes lumineux ou de *lumière*. Bien que cette partie de l'Électricité soit la plus délicate et peut-être la plus difficile, un grand nombre de ces phénomènes ont été observés bien avant tous les autres, parce que la nature nous a pourvus d'un organe particulier qui nous permet de les reconnaître par une sensation spéciale.

Afin de pouvoir passer en revue ces quatre classes de phénomènes sans entrer dans des développements excessifs, nous devrons supposer que les faits élémentaires sont connus et nous chercherons immédiatement leur explication.

2. Les physiciens qui ont le plus fait pour développer nos connaissances sur la nature réelle de l'Électricité, sont sans contredit Franklin, Cavendish, Faraday et Maxwell. Nous pourrions sans doute ajouter sir W. Thomson, s'il n'était pas toujours délicat d'estimer la valeur de penseurs encore vivants.

Aussi, comme Maxwell a reconnu explicitement la part qu'il devait à son illustre contemporain, dont l'œuvre ne pourra être appréciée que par les générations à venir, nous pouvons considérer actuellement Maxwell comme le représentant de cette grande École anglaise de Physique mathématique dont les travaux seront une des gloires de ce siècle (¹).

Les idées relatives à l'électrisation que nous allons exposer peuvent être considérées en quelque sorte comme le développement des vues de cet homme remarquable qui a nom Benjamin Franklin. Les expériences si précises et si décisives de Cavendish constituaient déjà une base assurée pour la théorie moderne de l'Électricité; mais, comme il ne les avait point publiées, Faraday dut refaire son œuvre en profitant des connaissances acquises pendant les trois quarts de siècle qui les séparent.

Ces deux savants, et en particulier Faraday, ont pénétré si avant dans l'étude des phénomènes électriques qu'ils leur ont livré leurs secrets, mais arrivés à ce résultat le plus souvent par voie d'intuition, ils n'ont pas toujours été capables de se faire entendre de leurs contemporains, ni surtout de faire comprendre la signification profonde de leurs spéculations. C'est alors que Maxwell parut, avec sa pénétration et son grand pouvoir d'assimilation combinés à une connaissance approfondie des méthodes mathématiques; il reprit les idées et les modes d'expression mis en avant par Faraday, rassembla les faits trouvés par lui et montra leurs rapports avec les théories de Green, de Stokes et de Thomson. De cette union est née la science moderne de l'Électricité, dont les progrès ont

---

(¹) Le lecteur trouvera peut-être que l'Auteur fait bon marché de cette École française qui compte cependant des savants comme Coulomb, Poisson et Ampère, dont les travaux en Électricité sont de premier ordre. S'ils n'ont pas cherché à pénétrer la *nature intime de l'Électricité*, ce qui eût été au moins prématuré, les lois qu'ils ont formulées, indépendamment de toutes hypothèses, restent encore à la base de la *théorie mathématique de l'Électricité*.

Cet oubli est d'autant moins justifié que, ainsi qu'on le verra plus loin, l'Auteur tire grand parti de la *théorie* d'Ampère sur le Magnétisme, la seule que nous ayons encore aujourd'hui.

(*Note du Traducteur.*)

été si rapides, et qui promet pour l'avenir des généralisations encore plus étendues et plus hardies.

3. Dans le siècle dernier, on avait édifié des théories matérielles de l'Électricité, ou théories dites *des fluides*, contre lesquelles s'est produite une réaction très forte ; il y a même eu assez récemment une tendance à dénier toute nature matérielle à l'Électricité et à considérer celle-ci comme une forme de l'énergie. Cela sans doute par une analogie assez naturelle, quoique non justifiée, avec le son, la chaleur et la lumière, dont on a fait voir que ce n'étaient que des formes de l'énergie. Mais, pour l'Électricité, il n'en est pas de même. L'Électricité est peut-être une forme de la matière, ce n'est pas une forme de l'énergie. Il est parfaitement juste que l'Électricité *sous tension* ou *en mouvement* représente de l'énergie, mais on peut en dire autant de l'eau ou de l'air, et cependant on ne songe pas à leur dénier la qualité de matière.

Il faut bien remarquer dans quel sens nous employons le mot *Électricité*. L'*électrisation* est le résultat d'un certain travail dépensé, et constitue certainement une forme d'énergie; elle peut être créée et détruite en mettant un certain travail en jeu. Mais l'Électricité elle-même ne peut jamais être créée ni détruite, elle est simplement mise en mouvement ou sous tension, comme la matière. Nul n'a jamais pu obtenir une trace d'Électricité positive sans qu'il y eût quelque part dans le voisinage une quantité égale d'Électricité négative.

La preuve la plus simple de ce fait consiste à faire les expériences d'électrisation dans une chambre conductrice, isolée et complètement close, d'une capacité quelconque. Toutes les expériences électriques connues étant exécutées à l'intérieur d'un espace de ce genre, des corps fortement électrisés y étant déplacés, des étincelles excitées, etc., etc., un galvanoscope sensible relié aux parois n'indiquera pas le plus léger effet permanent. En d'autres termes, la chambre ne peut jamais se charger. J'ai dit effet *permanent*, parce qu'il est possible que de faibles actions transitoires se produisent durant les réarrangements rapides des charges intérieures.

Bien que je ne sois pas fixé au sujet de la possibilité de ces

derniers effets, ils n'auraient en tout cas rien à voir avec la question actuelle ([1]).

Aucune expérience d'électrisation ne pouvant donner lieu à la création de la moindre quantité d'Électricité, la seule manière possible de charger la chambre est d'y introduire de l'extérieur quelque corps préalablement chargé.

Ces faits permettent d'établir une première grande loi que l'on peut exprimer de diverses manières, par exemple en disant que la somme algébrique totale d'Électricité libre est toujours nulle, que nous ne pouvons produire d'électrisation positive sans une électrisation égale et opposée, ou bien que si un corps reçoit une certaine quantité d'Électricité, un autre corps en perd autant.

Mais, quand nous avons cette notion qu'une chose est toujours produite en quantités égales et opposées, de sorte que lorsqu'un corps en gagne, un autre en perd, il est bien plus simple de considérer cette chose non comme créée dans un corps et détruite dans l'autre, mais comme simplement *transmise* ou *transportée*. *L'Électricité se comporte donc sous ce rapport comme une substance matérielle*. C'est ce que Franklin reconnut.

4. Une seconde grande loi, c'est que l'Électricité circule toujours, dans toutes les circonstances, dans un circuit fermé, la même quantité traversant chaque section du circuit, en sorte qu'il n'est pas possible de la raréfier dans une partie de l'espace pour la condenser dans une autre.

On peut aussi exprimer ce fait en disant qu'il n'y a pas de charge à l'intérieur d'un conducteur creux, toute la charge étant concentrée à la surface, ou que la charge induite est toujours égale et opposée à la charge inductrice. Cette seconde

---

([1]) Les récentes expériences de M. Hertz répondent à cette question de l'Auteur, et montrent que pour des oscillations dont la période est de l'ordre du billionième de seconde, une paroi métallique pleine, ou même un treillage d'une épaisseur minime joue le rôle d'écran absolu pour les perturbations dues à l'induction électro-magnétique, comme la cage de Faraday le fait pour l'induction statique.

(*Note du Traducteur.*)

grande loi peut également être illustrée par l'expérience de la cage de Franklin.

Nous avons reconnu qu'une électrisation effectuée à l'intérieur d'une chambre ne produit aucun effet sur un électroscope extérieur, relié aux parois; introduisons-y maintenant une charge par une ouverture pratiquée pour un instant. Immédiatement la chambre se charge et d'une quantité précisément égale à celle qui a été introduite dans l'intérieur. Il n'est nullement nécessaire que cette charge soit communiquée aux parois mêmes, il suffit qu'elle soit entièrement enfermée. Un déplacement de cette charge, ou sa décharge sous forme d'étincelles sur les parois n'apportent pas la plus légère modification à l'électromètre.

Ces deux expériences sur la chambre close ont été effectuées par Faraday.

Une autre manière d'illustrer les mêmes faits, consiste à employer une cage contenant un électroscope relié aux barreaux. La cage peut être chargée fortement, son potentiel porté d'un millier de volts à la même valeur négative, des étincelles peuvent en être tirées, l'électroscope reste immobile, du moins si les barreaux sont assez voisins pour qu'on puisse considérer cette cage comme un espace clos. Pour que l'expérience réussisse à coup sûr, il faut relier l'électroscope aux barreaux, car sans cela il pourrait être affecté par des charges entraînées par convection par l'air en mouvement.

A ce point de vue, un réseau n'est pas parfait, et nous avons pu faire dévier fortement un électroscope placé derrière une fine toile métallique par le *vent électrique* provenant d'une *pointe* placée en regard. Une chambre à parois pleines offre seule une protection absolue, et c'est ce qui engagea Faraday à faire son expérience classique, en s'enfermant lui-même dans une chambre de grandes dimensions.

Mais peut-être la vérification la plus rigoureuse de cette loi est-elle celle que Cavendish a imaginée et qui est connue en France sous le nom d'*expérience de Biot*. Elle consiste à charger fortement une sphère isolée pourvue de deux calottes hémisphériques, que l'on peut enlever ensuite en reliant la sphère à un électroscope; celui-ci n'indique alors aucune élec-

trisation. Cette expérience a été répétée par Clerk Maxwell dans le laboratoire Cavendish à Cambridge, en employant un électromètre à quadrants de Thomson et tous les dispositifs modernes, avec un résultat absolument négatif (¹).

Ces diverses expériences sont fondamentales et nous donnent une indication de la plus haute importance sur la nature de l'Électricité. Voyons quelles conséquences nous pouvons en tirer.

5. Ayant reconnu qu'il est impossible de charger un corps, au sens propre, avec de l'Électricité, que bien que nous déplacions celle-ci de place en place, elle remplit toujours et instantanément le corps dont nous la tirons, en sorte qu'aucune portion de l'espace ne peut en contenir une plus grande proportion, il est naturel d'exprimer ce fait en disant que l'Électricité se comporte comme un fluide parfaitement *incompressible* remplissant tout l'espace. Nous ne voulons pas dire par là que l'Électricité soit réellement un liquide incompressible, mais seulement qu'elle se comporte de la même manière et obéit aux mêmes lois.

Il importe de bien faire la distinction, et nous devons toujours être prêts à reconnaître, s'il y a lieu, une différence entre les deux ordres de phénomènes ; une seule discordance bien établie suffirait à détruire toute hypothèse de ce genre. Cependant, jusqu'à ce qu'une divergence ait été constatée, nous sommes justifiés à poursuivre cette analogie.

Si l'on refuse comme illégitime le concours apporté par cette analogie ou toute autre, il ne nous reste plus qu'à imiter les mathématiciens habitués à vivre parmi de purs symboles, et qui peuvent se dispenser de se former une représentation quelconque des phénomènes, ou sinon, nous ne pouvons re-

(¹) *Voir* MAXWELL, *Electrical Researches of Cavendish*, pp. 104 et 417. Une intéressante expérience effectuée sur des bulles de savon par M. Vernon Boys montre ce fait que l'épaisseur à laquelle une charge pénètre est moindre que le diamètre de quelques molécules, car une bulle de savon placée à l'intérieur d'une autre est entièrement garantie contre tous les effets électriques.

connaître les progrès réalisés dans la connaissance de la nature des phénomènes électriques.

Hâtons-nous de dire que nous ne considérons nullement les *théories modernes* que nous allons exposer comme des *théories définitives;* nous n'avons pas non plus la prétention de résumer toutes les spéculations qui ont bien pu se présenter à l'esprit des plus avancés de nos physiciens. Tout ce que nous pourrons faire est d'esquisser l'état actuel des connaissances acquises. D'ici à un quart de siècle, elles seront sans doute dépassées d'autant qu'elles surpassent les doctrines classiques de l'enseignement élémentaire.

6. Imaginons que nous vivions immergés dans un milieu illimité d'un fluide incompressible et inexpansible, comme les poissons vivent dans la mer; comment pourrons-nous avoir connaissance de son existence? Ce n'est pas par son *poids*, puisque nous ne pouvons pas en isoler une partie pour le peser; nous pouvons, il est vrai, peser l'air, mais c'est uniquement parce que nous pouvons le comprimer et le raréfier. Une pompe quelconque à vide ou de compression était nécessaire avant que nous puissions estimer le poids de l'air ou sa pression. Si c'eût été un fluide incompressible, sans espaces vides, des pompes n'eussent pu servir dans ce but, et nous serions complètement ignorants du poids et de la pression de l'atmosphère. Comment alors aurions-nous réussi à en avoir connaissance? De *quatre* manières différentes :

1° En pompant ce liquide parfait d'un réservoir élastique dans un autre et en observant les phénomènes de tension éprouvés par les parois de nos réservoirs, ainsi que leur tendance à crever lorsqu'elles seraient distendues. (Mais non pas en le transvasant d'un vase dans un autre, car, si nous vivions au fond de la mer, l'idée ne viendrait jamais d'emplir ou de vider des récipients, cette idée serait absurde, tandis que nous pourrions emplir ou vider des réservoirs *élastiques*.)

2° En donnant lieu à des courants, et en observant l'effet produit par le mouvement dans ce fluide, lorsqu'il circule dans des tuyaux ou au travers de corps poreux, et par l'effet de son inertie et de sa force vive.

3° En excitant des remous et des tourbillons dans ce fluide, et en étudiant les actions réciproques de ces *vortices*, leurs attractions et répulsions.

4° En produisant un *mouvement ondulatoire* dans ce milieu, c'est-à-dire en observant les phénomènes qui dans les fluides pondérables produisent sur nous la sensation du *son*.

C'est par ces quatre ordres d'effets, et par aucun autre à ma connaissance, que nous avons pu percevoir les phénomènes électriques. Ils correspondent aux quatre subdivisions que nous avons établies en commençant.

7. Cependant, il y a des différences, des différences notables entre les propriétés du milieu matériel que nous avons supposé et celles de l'Électricité. En premier lieu, il est douteux que l'Électricité en elle-même, indépendamment de la matière, ait de l'*inertie* (ou mieux de la masse). Il n'est pas dit qu'elle n'en ait pas : les expériences faites par Maxwell avec un résultat négatif prouvent seulement que sa vitesse de translation est très faible, ou qu'un courant électrique consiste en deux flux égaux, opposés et de même force vive.

Les lois du flux électrique dans les conducteurs indiquent que l'Électricité n'a pas d'inertie, et le fait serait concluant si M. le professeur Poynting n'avait montré récemment qu'il peut s'expliquer tout autrement, en laissant la question de l'inertie absolument ouverte; d'un autre côté, les phénomènes magnétiques semblent exiger cette inertie ou quelque propriété connexe. En tout cas, il est bien certain que lorsque l'Électricité se trouve en présence des isolants ou des diélectriques, la *combinaison* possède de l'*inertie*.

Une autre différence plus sérieuse et plus certaine entre les propriétés de l'Électricité et celles d'un fluide incompressible se présente dans les phénomènes de la quatrième catégorie, ou des mouvements ondulatoires. Dans un fluide incompressible, la vitesse de propagation et la longueur d'onde seraient toutes deux infinies, et aucun des phénomènes dus à la *propagation* graduelle d'*ondes* au travers du milieu ne pourrait exister. Un pareil milieu ne permettrait pas les vibrations sonores dans le sens ordinaire. D'un autre côté, il est

à peu près établi que les vibrations causées par les radiations lumineuses ont lieu à angle droit par rapport à la direction de propagation — ce sont des perturbations transversales — et de telles perturbations ne peuvent être transmises par un fluide parfait. Rappelons-nous toutefois que le milieu qui transmet les ondulations lumineuses est l'éther, et non pas simplement l'Électricité. Nous n'avons nullement affirmé que l'*Électricité* et l'*éther* soient identiques. S'ils l'étaient, nous devrions admettre que l'éther bien que fluide, en ce sens qu'il permet à une masse de s'y mouvoir librement, présente cependant une certaine rigidité pour des perturbations oscillatoires extrêmement rapides et de peu d'amplitude.

S'ils ne sont pas identiques, nous pouvons dire, d'une manière un peu vague et grossière, que l'éther contient l'Électricité, comme une masse gélatineuse contient de l'eau, et que la rigidité que le milieu présente pour les oscillations transversales ne provient pas du fluide même, mais de la manière dont il est emprisonné dans le réseau formé par la masse. Quoi qu'il en soit, il y a là une difficulté que nous pourrons peut-être surmonter d'une manière plus satisfaisante d'ici quelque vingt ans.

Provisoirement, nous nous servirons de cette hypothèse de l'éther consistant en Électricité dans un état d'emprisonnement semblable à celui de l'eau dans une masse gélatineuse; nous y sommes du reste amenés par l'étude des phénomènes de la Classe I (Électrostatique), autrement les propriétés des isolants seraient difficiles à concevoir. S'il est établi que l'*espace* (le vide) est *conducteur*, ce qui me paraît fort improbable, nous devrions alors admettre inversement que notre milieu est rigide seulement pour les vibrations infinitésimales, et fluide pour des forces constantes.

CHAPITRE II.

LE DIÉLECTRIQUE.

---

9. Revenons maintenant à l'Électrostatique. Nous nous imaginons toujours vivant dans notre fluide incompressible et qui remplit tout l'espace, comme les poissons vivent dans la mer; mais si c'était réellement notre état, nous n'aurions pas plus de notion de l'existence de ce fluide que les poissons n'en ont du milieu qu'ils habitent. Si tous les corps étaient des conducteurs parfaits, ce serait notre cas; dans un milieu parfaitement mobile, il n'y a pas d'isolation, aucun obstacle au mouvement : c'est le fait des isolants qui permet les phénomènes de l'Électrostatique.

Nous pourrions, il est vrai, empêcher le mouvement en employant des réservoirs clos, et isoler une quantité définie du liquide dans lequel nous serions complètement immergés. Mais comment pourrions-nous pomper du liquide d'un réservoir à l'autre, de manière à charger l'un positivement et l'autre négativement? C'est seulement par l'emploi de parois élastiques : en nous servant d'outres élastiques ou de diaphragmes disposés au travers de canaux continus. En sorte que nous pouvons nous représenter par analogie un milieu continu isolant (tel que l'espace) comme une masse gélatineuse, au travers de laquelle le liquide ne peut se mouvoir qu'en raison de fissures, de pores ou de cavités.

Modifions cette représentation d'un milieu indéfini d'un liquide parfait, en celle d'une masse indéfinie d'une substance

gélatineuse ou élastique dans laquelle le liquide est emprisonné, et au travers de laquelle il ne peut pénétrer sans violence et disruption, nous aurons une représentation d'un milieu isolant. Notre fluide n'est pas libre et mobile comme l'eau, il est rigide comme une gelée.

Néanmoins, les corps peuvent se mouvoir librement au travers. Tous les *corps* le peuvent, car c'est seulement le liquide lui-même qui est emprisonné. Il n'est pas facile d'exprimer comment nous devons nous représenter d'une manière naturelle le déplacement de la matière ordinaire au travers du milieu isolant. C'est une difficulté, non pas insurmontable, mais réelle, et due à l'imperfection de notre analogie.

Les isolants étant semblables à des diaphragmes élastiques ou à des masses impénétrables, bien qu'elles puissent céder un peu, les conducteurs sont semblables à des cavités, ou à des masses poreuses ou spongieuses parfaitement perméables à notre liquide, bien qu'avec plus ou moins de frottement.

Ainsi, tandis que des corps aisément pénétrables par la matière sont impénétrables à l'Électricité, d'autres corps, comme les métaux, qui résistent absolument au passage de la matière, sont au contraire parfaitement perméables à l'Électricité. C'est cette inversion de nos idées ordinaires sur la *pénétrabilité* qui constitue une petite difficulté lorsqu'on commence l'étude de ces questions.

Néanmoins, supposons qu'elle soit surmontée, et considérons des sphères ou des cylindres isolés reliés par des fils de métal, comme autant de cavités et de tubes dans un milieu qui est, à part 'cela, continu, élastique, impénétrable, qui les environne et s'étend dans tout l'espace. Le tout cependant, les cavités aussi bien que le reste, est complètement rempli du fluide universel. Ce fluide qui est emprisonné dans les isolants est libre de se mouvoir dans les conducteurs. De là il suit que la pression ou le potentiel du fluide est le même dans toutes les parties d'un conducteur dans lequel il ne se meut pas, puisque autrement, s'il y avait des différences de pression, un flux s'établirait, jusqu'à ce que celle-ci soit égalisée. Dans un isolant ce n'est plus le cas, elles peuvent avoir lieu et sont naturellement accompagnées d'un état de tension du milieu.

10. Comme on le sait, on a établi autrefois deux théories de l'Électricité, basées sur l'hypothèse *des fluides* : la théorie du fluide unique de Franklin, et celle des deux fluides de Dufay. L'une et l'autre ont leurs avantages. Sur quelques points, sur bien des points, elles sont certainement inexactes et peuvent conduire à des conséquences erronées, *mais c'est le fait qu'elles reposent sur la notion de l'action à distance qui les condamne, et non point l'hypothèse des fluides*. Dans ces théories, on s'attache surtout aux conducteurs, tandis que Faraday nous a appris à porter notre attention sur le milieu isolant qui entoure ces conducteurs : le *diélectrique,* comme il l'a appelé. C'est ce milieu qui est le siège de la plupart des phénomènes, les conducteurs ne font que d'en rompre la continuité.

Pour Faraday, l'espace environnant les conducteurs est rempli de ce qu'il appelle les *lignes de force,* et c'est la partie la plus importante de son œuvre en Électrostatique que d'avoir appelé l'attention, détournée par une apparence, sur la partie essentielle des phénomènes. Avant d'aller plus loin, nous allons considérer son point de vue, qui est certainement correct et indépendant de toute hypothèse.

Reprenons la vieille expérience classique qui consiste à frotter l'un contre l'autre deux corps, qui, séparés, présentent alors les phénomènes d'attraction et de répulsion, avec une balle de sureau par exemple; comment devons-nous maintenant considérer le fait ? Supposons par exemple le cas de deux disques, l'un en métal, l'autre en soie; lorsqu'ils sont en contact, il s'opère un transfert d'Électricité du métal à la soie ; le frottement aide à cet effet, la soie n'étant pas conductrice. Séparons-les ensuite. Lorsqu'on opère cette séparation, le milieu intermédiaire est alors soumis à un état de tension; on peut représenter cet état par une série de lignes, nommées *lignes de force,* qui passent d'un disque à l'autre, et qui coïncident avec la direction de la tension en chaque point.

Comme Faraday le fit remarquer, l'état du milieu est le même que si les lignes étaient remplacées par des *fils élastiques* qui se repousseraient les uns les autres tout en tendant à se raccourcir. En d'autres termes, il se produit une tension le

long de ces lignes et une pression dans la direction normale. Lorsque les disques sont très voisins et les lignes courtes, elles sont à peu près droites, comme l'indique la *fig.* 1. Mais, lorsque la distance augmente, elles s'incurvent, en s'écartant

Fig. 1.

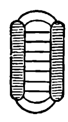
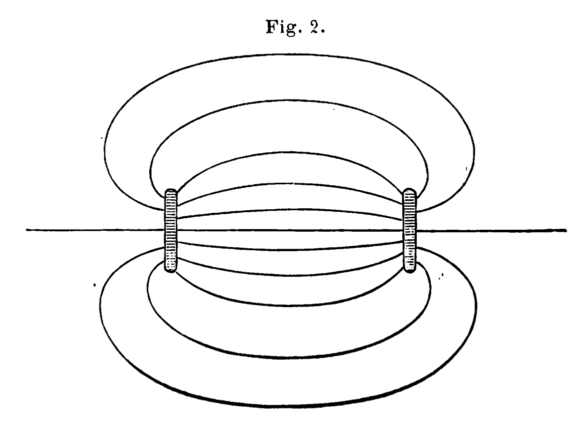


Diagramme représentatif de l'état du milieu dans le voisinage de deux disques chargés en sens inverse et très rapprochés.

de l'axe de symétrie, et une partie vient même aboutir sur le dos des disques (*fig.* 2). Lorsque enfin ils sont infiniment

Fig. 2.



Même cas que *fig.* 1, après écartement des disques.

éloignés, il aboutit autant de lignes d'un côté que de l'autre, et nous avons un corps chargé isolé dans l'espace.

L'état de tension existant dans le milieu, entre les disques, a pour résultat une force réciproque qui tend à rapprocher les deux corps, comme s'ils étaient unis par des fils élastiques tendus, de longueur initiale nulle.

Les extrémités de ces lignes constituent ce que l'on nomme les *charges électriques* et ces lignes tendent continuellement

à se raccourcir, de manière que leurs extrémités coïncident et que l'état de tension disparaisse.

Si l'un des disques touche un autre corps conducteur, quelques-unes de ces lignes le quittent et passent instantanément sur l'autre; en d'autres termes, les charges peuvent être transférées et le nouveau corps est attiré par le second disque de la même manière que le premier.

Si ce nouveau corps *entoure complètement* le disque, il recueille toutes les lignes qui y aboutissaient et ce dernier peut en être retiré à l'état neutre.

11. Considérons maintenant nos deux disques chargés en

Fig. 3.

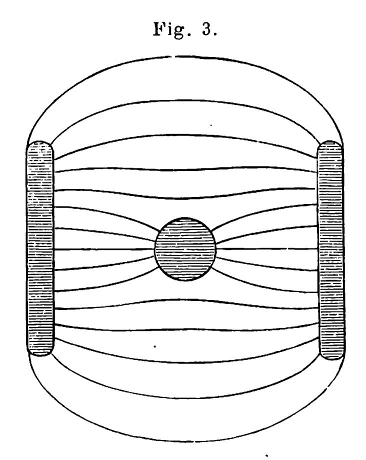
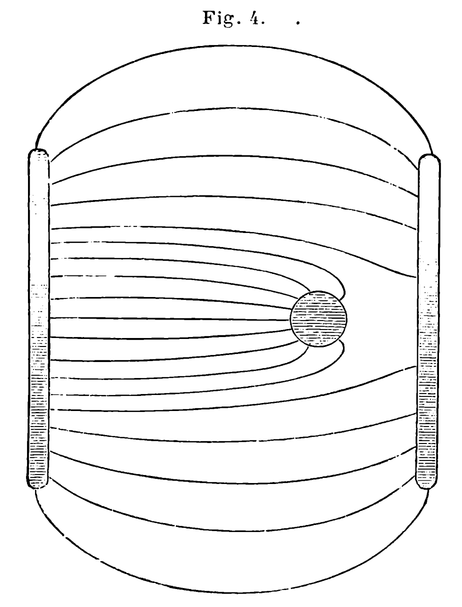


Diagramme représentant l'état du milieu entre deux disques chargés lorsqu'on y introduit une sphère à l'état neutre. Les deux hémisphères sont alors chargés par *induction*.

face l'un de l'autre, et introduisons entre eux une balle de sureau suspendue à un fil isolant. Comme c'est un conducteur, il n'y a pas intérieurement de tension, en sorte qu'elle agit comme un espèce de pont et plusieurs lignes passent au travers, ou mieux se terminent d'un côté et commencent à l'autre, en sorte qu'elle possède des charges opposées sur ses deux faces. En un mot, il y a *induction* (*fig.* 3). Si maintenant nous suivons cette balle jusqu'à ce qu'elle touche l'un des

disques (*fig.* 4), les lignes comprises dans l'intervalle ont disparu, et il ne reste plus que celles qui aboutissent de l'autre côté. En d'autres termes, elle a pris au disque qu'elle touche un certain nombre de ses lignes. Celles-ci tendent à l'attirer vers l'autre disque et à se raccourcir et à disparaître quand elle viendra en contact, et ainsi de suite; la balle réunit conti-

Fig. 4.



Décharge par contacts alternatifs; la balle oscillante vient de quitter le disque de droite.

nuellement de nouvelles lignes des deux disques et les fait se dissiper, jusqu'à ce que les deux disques soient déchargés.

Cette manière de considérer les choses ne suppose aucune hypothèse, c'est l'expression du fait même. Les *lignes de force* ne sont ni plus ni moins réelles que des *rayons de lumière*, tous deux constituent une expression commode.

12. Mais, tant que nous nous en tenons à ce mode d'expression, nous ne pouvons nous former une représentation mentale des phénomènes qui se passent réellement. En Optique,

Il est d'usage d'abandonner la considération des rayons lumineux à partir d'un certain point, et de considérer des ondes, qui, nous le savons, se rapprochent davantage de l'essence du phénomène, bien que nous ne sachions pas encore grand chose sur leur véritable nature.

De même en Électricité, il convient d'abandonner cette notion des lignes de force et les théories basées sur le potentiel et d'essayer de concevoir le siège réel de ces tensions et du mouvement. C'est alors que nous sommes amenés à des considérations semblables à celles qu'on retrouve dans l'étude d'un fluide incompressible.

Dans un certain sens, nous avons de nouveau émis une théorie de l'Électricité basée sur la considération d'un *fluide*, et une partie des notions relatives aux anciennes théories subsistent également dans celle-ci.

Ainsi l'idée de Franklin qu'une charge positive correspondrait à un excès et une charge négative à un déficit d'une certaine quantité normale d'un fluide, caractérisant l'état neutre des corps, cette idée reste encore juste.

Il est toujours exact que ce fluide n'est jamais créé, mais passe d'un corps à l'autre en quantités exactement correspondantes. Une certaine partie, moindre cependant, de la théorie des deux fluides reste juste d'après moi; mais nous ne nous occuperons pas de celle-ci pour le moment, et nous nous attacherons seulement à la théorie du fluide unique.

Nous comparons une machine électrique à une pompe, qui, étant reliée à deux corps, soutire à l'un de l'Électricité qu'elle fournit à l'autre, en donnant ainsi aux deux corps des charges positives et négatives égales. L'un de ces corps peut être la terre; dans ce cas, la charge qui en est tirée ne modifie en rien son état.

13. Mais, comme on l'a déjà fait remarquer, si l'Électricité est semblable à un fluide incompressible et inexpansible, comment est-il possible de la retirer d'un corps pour la transmettre à l'autre? Avec des corps rigides, cela n'est pas possible, mais bien avec des corps élastiques. Le fait de charger une sphère revient par suite à pomper de l'eau dans une *outre*

élastique, ou mieux à l'intérieur d'une cavité disposée au milieu d'un corps élastique, dont les parois épaisses exigent une forte pression pour être distendues, et s'étendent de tous côtés.

Supposons deux de ces *cavités*, et considérons le fluide qui est transféré de l'une à l'autre, on voit que la charge (soit l'excès ou le déficit de fluide) se trouve à l'extérieur. On voit aussi que lorsque les deux sont *chargées* d'une manière semblable, le milieu est soumis à un état de tension qui a pour résultat d'*écarter* les deux cavités, tandis que si l'une est distendue et l'autre contractée, elles tendent à se *rapprocher*.

Nous pouvons de plus supposer que l'on pompe du fluide d'une seule de ces cavités ou que l'on en soutire, et considérer l'effet produit sur l'autre; c'est le cas de l'*induction*, et l'on voit que le côté voisin de la seconde cavité se charge en sens inverse (c'est-à-dire que les parois font saillie dans le vide), tandis que l'autre côté se charge de la même manière (c'est-à-dire que la cavité gagne sur les parois). La pression du fluide dans cette cavité varie d'une manière correspondante au changement de pression de la cavité chargée ou inductrice.

En d'autres termes, le potentiel de conducteurs voisins de corps électrisés positivement augmente.

Les variations de volume nécessaires pour produire la distension de ces cavités rendent l'analogie incomplète. Pour éviter cette objection, on pourrait être amené à admettre une conception dualistique de l'Électricité, une sorte de théorie des *deux fluides*, théorie que plusieurs phénomènes tendent à nous faire admettre, et sur laquelle nous reviendrons.

14. *Circuit de retour*. — On a quelquefois une certaine difficulté à concevoir le flux de l'Électricité dans un circuit fermé, comme par exemple dans le cas des câbles transatlantiques, si l'on suppose que les extrémités soient à la terre qui sert de retour. Comment l'Électricité revient-elle à son point de départ?

Il suffit de se représenter un tube reliant l'Europe à l'Amérique, complètement rempli d'eau, et dont les deux extrémités plongeraient dans la mer. Si maintenant l'on pompait un peu

d'eau dans ce tube à l'une des extrémités, une quantité égale en sortirait à l'autre bout, et le niveau de l'Océan, un moment détruit, se rétablirait. Ce n'est pas précisément la même eau qui reviendrait à l'autre bout, mais une quantité égale. C'est tout ce que nous pouvons dire de l'Électricité, dont on ne peut jamais distinguer une certaine quantité d'une autre quantité égale.

Pour imiter, dans ce cas, l'*induction électrostatique* dans les câbles, notre tube devrait avoir des parois un peu élastiques; du reste, pour obtenir la même *vitesse dans les signaux*, il faudrait que l'eau fût incompressible, et non élastique comme elle l'est réellement, sinon chaque perturbation exigerait environ trois quarts d'heure pour se transmettre d'un bout à l'autre.

CHAPITRE III.

CHARGE ET INDUCTION.

15. *Condensateurs.* — En reprenant le problème de la charge des corps, comment devons-nous expliquer le fait qu'en approchant d'un conducteur une plaque reliée à la terre, on augmente sa capacité, en sorte qu'une même *pression* augmente la quantité de fluide accumulé?

En d'autres termes, comment devons-nous nous représenter une *bouteille de Leyde*, un condensateur?

Tout simplement, en considérant que le fait d'approcher un conducteur mis à la terre revient à *diminuer l'épaisseur du diélectrique*, de tous côtés autour du corps en question. Le milieu élastique sous une paroi mince exige une force moindre pour être distendu d'une quantité donnée qu'en masse épaisse; en d'autres termes, il a une *capacité* plus grande. Rappelons-nous que la capacité de cavités élastiques ne peut pas se mesurer comme celle de vases, par la quantité maximum nécessaire pour les remplir; elles ne sont jamais *pleines* tant qu'elles ne crèvent pas. La quantité nécessaire pour cela mesure plutôt leur force que leur capacité. La seule bonne définition de la capacité dans ce cas, c'est le rapport entre l'augmentation de la quantité contenue à l'augmentation de pression nécessaire pour l'y forcer, et c'est précisément la définition de la *capacité* électrique.

Une bouteille de Leyde est l'analogue d'une cavité dont les parois seraient très minces, ou si l'on veut d'une outre élastique.

Mais si on l'amincit par trop, ou si on la tend par trop, cette membrane finira par crever, exactement comme une bouteille de Leyde que l'on surcharge. Quelquefois, c'est le diélectrique solide qui se rompt tout à fait; ordinairement, c'est l'air qui cède, mais ici, comme avec tous les isolants fluides, le milieu reprend immédiatement ses propriétés.

La bouteille de Leyde présente plusieurs particularités importantes et intéressantes. Par exemple, si elle est isolée, on ne peut la charger : le potentiel des deux armatures augmente également; aussi, lorsqu'on charge une bouteille, pour chaque étincelle positive fournie à l'intérieur, une étincelle positive équivalente doit être tirée de l'extérieur. C'est ce qui se présente lorsqu'on la charge ou la décharge par contacts alternés ou par la balle oscillante; c'est également le cas lorsqu'il y a charge avec étincelle.

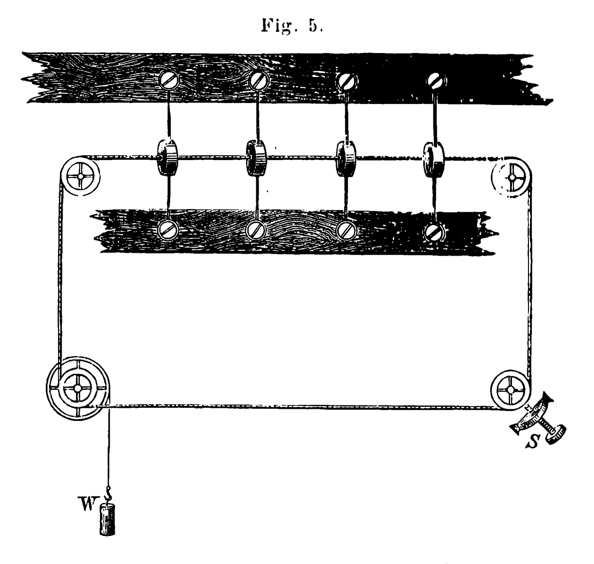
Mais, comme on le sait, toutes les fois qu'on *charge* un corps, c'est comme si l'on chargeait une bouteille de Leyde. L'armature extérieure se trouve toujours quelque part sur les murs de la salle, à la surface de la terre ou n'importe où; on a toujours une couche de diélectrique entre les deux charges, la *charge inductrice* et la *charge induite*, comme on les appelle. On ne peut charger un corps isolément.

16. Afin d'illustrer le phénomène de la *charge*, on peut se servir de la représentation suivante, qui permet de se rendre compte de la nature du phénomène d'une manière plus simple, quoique moins complète, que l'analogie hydrostatique. En premier lieu, considérons une corde sans fin, inextensible, mobile sur des poulies; ceci nous représente l'Électricité s'écoulant dans un circuit fermé. Des forces électromotrices sont alors des causes capables de mouvoir cette corde, et l'on peut les représenter par une manivelle, ou par un poids agissant sur le tambour W. Un élément de pile correspondra à un faible poids; une machine électrique, à une manivelle puissante mais tournant lentement. Caler la corde avec la vis S revient à rendre la résistance infinie.

Dans le cas de la *fig.* 5, la seule résistance au mouvement est le *frottement*, et la corde n'a aucune tendance à revenir

en arrière. Des perles fixes enfilées sur la corde nous représentent des atomes de matière et l'on peut les supposer plus ou moins grosses, pour représenter les différences des résistances spécifiques. Si l'on meut la corde, on obtient purement et simplement un développement de chaleur.

Fig. 5.



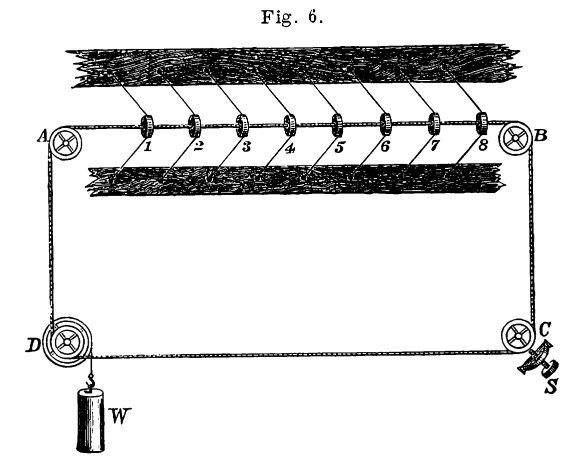
Modèle mécanique d'un circuit *métallique*.

Voyons maintenant la *fig.* 6; ici la corde est dans les mêmes conditions qu'avant, mais nos perles y sont attachées d'une manière fixe, en sorte que si la première se meut, elles doivent l'accompagner. Elles représentent par suite des particules d'une matière isolante; néanmoins, les liens qui les fixent ne sont pas absolument rigides; ils n'empêchent pas la corde de se mouvoir un peu; ils permettent ce que l'on appelle le *déplacement électrique*, qu'il ne faut pas confondre avec la conduction. On peut déplacer un peu ces corps, mais ils reviennent en arrière, lorsque la f. e. m. n'agit plus. Les perles sont supposées ici fixées à des fils élastiques; lorsqu'on substitue à la corde un tube sans fin plein d'eau, on les remplacerait par des diaphragmes élastiques.

Appliquons une f. e. m. donnée à notre corde, on produira un déplacement donné. Nous aurons plus de corde à l'un des bouts que dans l'état normal — il est chargé positivement — et moins à l'autre, chargé négativement.

Si la f. e. m. excède une certaine limite, la tension est

Fig. 6.



Modèle mécanique d'un circuit constitué en partie par un diélectrique : par exemple d'un condensateur chargé.
A est l'armature positive ; B, l'armature négative.

trop forte et les brins élastiques se rompent, nous avons une *décharge* avec étincelle. Mais, alors même que la tension est modérée, quelques-uns de ces liens peuvent être imparfaitement élastiques, et permettre un déplacement permanent graduel. Lorsque la décharge a lieu, elle ne s'effectuera pas d'emblée d'une manière complète; une grande partie du déplacement disparaît de suite, mais le reste reparaît lentement en produisant les décharges résiduelles.

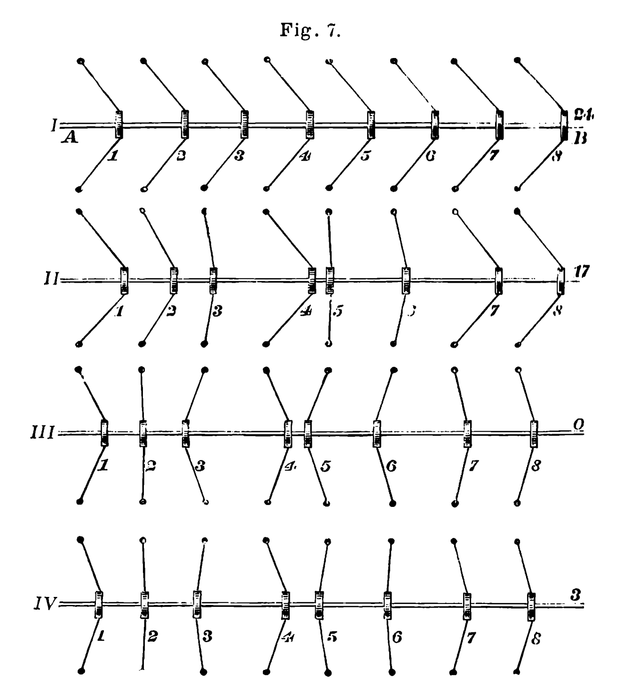
Si le diélectrique est d'une structure *stratifiée*, c'est-à-dire si certaines des perles permettent à la corde de glisser au travers, ou cèdent davantage que les autres, cet effet de charges résiduelles devient très prononcé.

17. Tous ces phénomènes sont aisés à comprendre et la

fig. 7 en montre les diverses phases. Dans le diagramme I nous avons supposé 8 couches ayant chacune subi un déplacement égal à 3 unités.

La réaction élastique étant proportionnelle au déplacement

Fig. 7.



Décharge d'un condensateur à diélectrique stratifié présentant des couches imparfaitement isolantes; mode possible d'explication de l'absorption électrique et des charges résiduelles.

I. Charge produite par une f. e. m. de 24 unités.

II. État du milieu après un certain temps; la différence de potentiel des armatures est réduite à 17 par les pertes intérieures. Le circuit extérieur étant toujours supposé parfaitement isolant, la charge des armatures AB reste constante.

III. Après la première décharge.

IV. État du milieu après un certain temps; charge résiduelle correspondant à une différence de potentiel 3 dans le sens de la f. e. m. primitive.

total, la force élastique sera égale à 24. Ce serait donc le modèle d'une bouteille de Leyde soumise à une f. e. m. de 24 unités. Si chaque couche est parfaitement isolante, c'est-à-dire si chaque perle est fixée rigidement au cordon, il ne se

passe plus rien tant que la force agit. Cet état de choses peut être maintenu de deux manières différentes, soit en faisant agir le poids W, c'est-à-dire en laissant la pile reliée au condensateur, ou bien en calant la corde, en rendant ainsi la résistance du circuit extérieur infinie, c'est-à-dire en isolant les bornes du condensateur.

Mais supposons maintenant que certaines des couches ne soient plus parfaitement isolantes, c'est-à-dire supposons que quelques-unes des perles puissent glisser lentement pour reprendre leur position normale sur le cordon. Dans ce cas, nous obtiendrons des effets différents, suivant que la pile reste dans le circuit ou non.

Supposons d'abord le premier cas réalisé, c'est-à-dire que nous laissons agir le poids. Si chaque perle glisse également, l'état de choses reste toujours le même, mais nous avons une perte continue à travers le condensateur, perte représentée par un mouvement lent et continu du cordon.

Au contraire, si toutes les perles ne glissent plus également, par exemple si quelques-unes sont fixées au cordon, le glissement des unes augmente la tension supportée par les autres, et la corde se déplace en avant, mais de plus en plus lentement, jusqu'à ce que les couches isolantes finissent par supporter la tension entière et la corde arrive asymptotiquement au repos.

C'est un effet que l'on observe dans les câbles sous-marins et les condensateurs; il se présente plus ou moins avec tous ceux-ci, si ce n'est les condensateurs à air, et constitue le phénomène appelé *absorption* de l'Électricité; il est accompagné d'une charge intérieure, car, ainsi qu'on peut le voir, la longueur normale de corde entre les perles n'est plus maintenue, quelques couches ont acquis un excédent de longueur, une charge positive, les autres ont perdu une longueur correspondante, charge négative.

La tension est distribuée d'une manière très inégale, mais la somme reste constante.

Supprimons maintenant la force électromotrice : nous obtenons d'abord une décharge rapide, puis un courant de décharge, ou un mouvement lent de la corde à mesure qu'elle est entraînée par les couches qui sont encore déplacées, au

travers de couches mauvaises conductrices qui sont maintenant déplacées en sens inverse; le temps que dure ce courant de décharge correspond au temps de charge.

Il est important de se rendre compte que ces effets sont parfaitement compatibles avec l'incompressibilité de l'Électricité, c'est-à-dire, dans notre modèle, l'inextensibilité de la corde.

La notion ordinaire de charges, positive et négative, pénétrant à l'intérieur du verre de la bouteille de Leyde pour venir à la rencontre l'une de l'autre et ressortant ensuite, est entièrement fausse, et le phénomène réel qui simule cette apparence est parfaitement clair.

Voyons maintenant ce qui arrive lorsqu'on isole le condensateur.

Ayant mis sous tension le diélectrique, isolons les bornes du condensateur, c'est-à-dire fixons la corde et regardons ce qui se passe. Si quelques-unes des perles glissent tandis que les autres sont fixes, on arrivera bientôt à l'état de choses représenté en II.

Les perles n°s 3, 5 et 6 ont glissé partiellement en arrière et la tension totale a été réduite à 17.

La bouteille paraîtra s'être partiellement déchargée elle-même par pertes intérieures, et cependant la corde n'a pas subi le moindre déplacement. Des charges intérieures se sont produites, elles sont positives entre 3 et 4 et entre 5 et 6, 6 et 7; négatives entre 2 et 3, 4 et 5. Les charges sur les armatures A et B sont restées *constantes :* la capacité de la bouteille paraît avoir augmenté, puisque la même charge est maintenue par une force électromotrice moindre. Tous ces effets paraissent également contraires à l'hypothèse de l'incompressibilité, mais notre modèle montre clairement qu'il n'en est rien.

Relâchons maintenant la corde pour un instant, c'est-à-dire déchargeons le condensateur et isolons-le de nouveau. A l'instant de la décharge, un flux d'Électricité (un déplacement de la corde) a lieu et la tension aux bornes tombe à zéro.

L'état de la bouteille déchargée, dans les premiers instants après la décharge, est représenté par le diagramme III. Les charges à la surface n'ont pas complètement disparu, les charges intérieures sont restées telles quelles, et toutes les

couches sont encore déplacées. Les couches isolantes gardent une partie de leur déplacement original, les couches imparfaites ont subi un déplacement en sens inverse, de manière à ramener la tension totale à zéro. Celle qui avait le plus glissé, le n° 5, a maintenant le plus grand déplacement en sens inverse. Mais cet état ne peut subsister. Les couches commencent à revenir lentement en arrière, et en peu de temps elles prendront la position IV, où les tensions des couches isolantes qui ne sont plus équilibrées actuellement exercent sur la corde une force égale à 3 dans la direction originale. C'est le phénomène de la *charge résiduelle* et en libérant la corde on peut produire la première décharge résiduelle. Mais, à ce moment encore, la bouteille n'est pas complètement déchargée. Un moment après, une nouvelle charge apparaît, et ainsi de suite, sans limites, jusqu'à ce que la somme de toutes les décharges résiduelles, augmentée de la première décharge, soit exactement égale à la charge primitivement communiquée, si aucune perte n'a eu lieu; si toutes les couches cèdent, il y aura naturellement une certaine perte.

18. La seule idée fausse dont il convient de se prémunir, en étudiant ce modèle mécanique, c'est qu'il y ait nécessairement un déplacement mécanique des atomes de matière accompagnant le *déplacement* électrique.

Manifestement, un modèle renfermant des points fixes pour

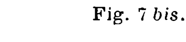
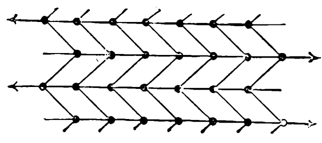


Fig. 7 *bis*.



y rattacher nos perles ne peut correspondre de près à des effets électriques. Pour avoir une analogie plus satisfaisante, nous devrions prendre un certain nombre de rangées de perles, fixées plus ou moins sur les cordons et reliées entre elles, en travers, par des cordons élastiques, comme cela est indiqué *fig.* 7 *bis*. Si ces cordons sont déplacés simultanément et alternativement

dans des directions opposées, et si nous supposons qu'ils représentent respectivement les deux Électricités, tandis que les perles représentent les éléments électro-positifs et électro-négatifs de la substance matérielle, nous avons alors quelque chose qui se rapproche peut-être davantage de la réalité. Ici, il n'y a plus de déplacements des molécules comme telles, mais un déplacement des atomes constituants ; il y a un effort de *cisaillement* appliqué à chaque molécule, qui, s'il est assez fort, peut donner lieu à la décomposition électrolytique. Je regarde la *décharge disruptive* comme ayant absolument ce caractère électrolytique.

19. Revenons au cas de la décharge pure et simple, et voyons comment elle s'effectue. Se fera-t-elle par un simple retour des perles à leur position primitive ? Oui, si la résistance du circuit est grande, mais non dans le cas inverse. Si la corde est à peu près libre, les perles vont repasser par leur position primitive avec une certaine vitesse, la dépasser, puis revenir et ainsi de suite; ce n'est qu'après une série d'oscillations qu'elles finiront par s'y arrêter. Ceci correspond à ce fait que la décharge d'un condensateur est généralement *oscillatoire*. L'étincelle qui paraît continue et instantanée se résout, lorsqu'on l'analyse par un miroir tournant très vite, en une série d'étincelles alternatives se succédant rapidement dans l'intervalle de quelques cent-millièmes de seconde (sir W. Thomson, Feddersen). Les oscillations continuent jusqu'à ce que l'énergie emmagasinée dans le milieu distendu se soit complètement dissipée en chaleur par les frottements.

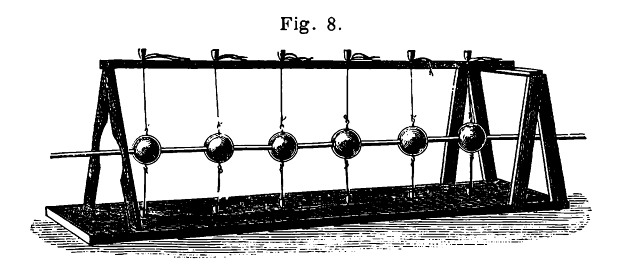
L'existence de ces oscillations prouve distinctement que l'Électricité en conjonction avec la matière possède de l'*inertie*. La rapidité de ces oscillations est prodigieuse : il peut y en avoir plusieurs centaines de millions par seconde, mais les oscillations peuvent être réduites à une dizaine de mille par seconde, suivant la capacité et l'inertie du circuit.

La *rapidité d'oscillation* et la vitesse avec laquelle elles s'amortissent, ainsi que les facteurs qui font que la décharge est oscillatoire ou constitue simplement un courant décroissant correspondent aux facteurs analogues qui règlent le mouve-

ment d'un ressort bandé qui revient à sa position première. Si le ressort se trouve dans un milieu visqueux, ou s'il n'a que peu de masse, il n'oscillera pas, mais retournera lentement et apériodiquement à sa position primitive. Au contraire, dans les circonstances ordinaires, il vibrera jusqu'à ce que l'énergie soit absorbée par les divers frottements.

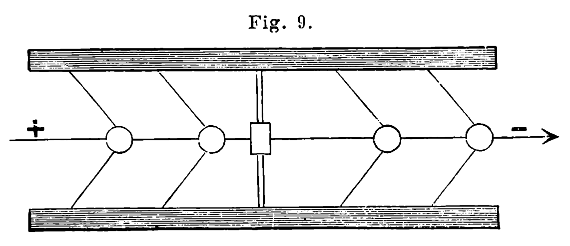
20. La *fig*. 8 représente un modèle de ce genre. Si l'on veut qu'il puisse donner aussi la *charge par induction*, il suffit d'introduire un conducteur dans le diélectrique polarisé; en d'autres termes, d'avoir une partie des perles fixes et à frottement, les autres étant fixées à des brins élastiques. Alors, lorsqu'un déplacement a lieu, il est évident qu'il y aura un excès de la corde d'un côté de la couche métallique et un déficit de l'autre (*fig*. 9). Cet état correspond aux charges induites égales et opposées sur un conducteur, comme dans celui de la *fig*. 3. Si maintenant la tension est supprimée d'un côté en

Fig. 8.



Modèle mécanique approché d'un diélectrique.

Fig. 9.



Couche conductrice interposée dans l'intérieur d'un diélectrique sous tension et chargée par induction (comparez *fig*. 3).

faisant revenir les perles en arrière sur ce côté-là, cela revient à relier le conducteur à la terre, comme dans la *fig.* 4. L'autre côté a alors à supporter l'effet de la f. e. m. entière, en sorte que la tension et la charge augmentent d'un côté. Si nous supprimons à ce moment la f. e. m. extérieure, la charge négative induite va apparaître, soit également des deux côtés du corps conducteur, soit d'une manière plus marquée du côté où il y a le moins de perles, c'est-à-dire du côté le plus rapproché d'autres conducteurs.

21. Comme c'est un phénomène qu'il convient de bien comprendre, nous avons indiqué dans les diagrammes de la *fig.* 9 *bis* les états successifs du milieu.

I représente un diélectrique ordinaire polarisé, une couche d'air par exemple, comprise entre deux armatures chargées A et B maintenues à une différence constante de potentiel. Pour plus de simplicité, on a supposé que le champ est uniforme, c'est-à-dire que les lignes de force sont des droites parallèles; ce qui serait approximativement le cas pour de très grandes armatures; on suppose en outre que B est à la terre.

La différence de potentiel entre A et B est supposée de 60 unités et elle est distribuée entre huit couches ou strates supportant chacune une tension de 7,5 unités, qui produit le déplacement indiqué, égal aux 0,75 de l'épaisseur d'une couche. Les charges en A et B seront égales respectivement à + 3 et — 3.

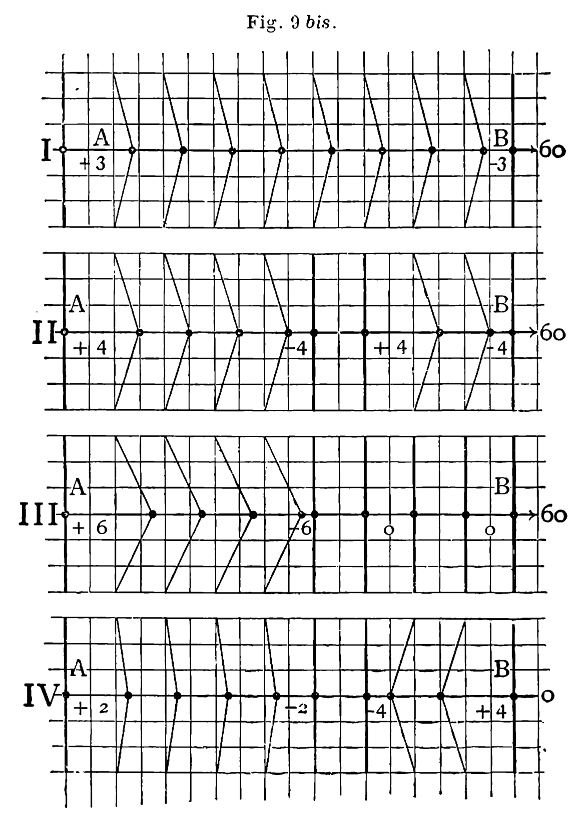
Introduisons maintenant une plaque métallique d'une épaisseur égale à 2 unités et qui vient remplacer deux de nos couches diélectriques. Les six autres sont maintenant soumises à une tension plus forte, et égale à 10; il en résulte donc un déplacement égal à une unité, et les charges sont de + 4 et — 4 unités. L'effet est par suite le même que si l'épaisseur du diélectrique avait été réduite dans le rapport de 4 à 3.

La plaque de métal intermédiaire a maintenant une charge — 4 du côté de A et + 4 du côté de B.

Dans le diagramme III, on a relié momentanément à la terre le diaphragme intermédiaire, ce qui a pour effet de soulager de toute tension le côté B, puisqu'on réunit métalliquement

les deux plaques de ce côté. Toute la tension est alors supportée par les quatre autres couches qui sont soumises chacune

Fig. 9 *bis*.



Charge d'un corps conducteur par induction.

(Les chiffres précédés des signes + et — se rapportent aux charges; ceux qui sont accompagnés d'une flèche indiquent les potentiels.)

à la tension 15, le déplacement étant de 1,5 et la charge de 6.

Si nous rompons maintenant la connexion à la terre, rien ne change, la charge d'un côté du diaphragme est toujours 6 et de l'autre côté elle est nulle.

Enfin cessons de faire agir la force électromotrice; la corde revient en arrière, sa tension s'annule, mais les deux couches

de droite doivent équilibrer les quatre de gauche, et par suite elles ont encore des déplacements respectifs de 1 et 0,5.

Les charges sur les faces du diaphragme sont — 2 et — 4, c'est-à-dire négatives toutes deux. Les charges sur A et B sont + 2 et + 4, bien qu'elles soient toutes deux au même potentiel. C'est ce que représente le diagramme IV, où le diaphragme a été chargé négativement par induction. Naturellement, il pourrait se faire qu'il fût chargé également sur ses deux faces, cela dépend de sa position relativement à A et B. Si, au lieu de maintenir l'armature A à un potentiel constant, elle possédait une charge constante, la série des phénomènes indiqués différerait un peu, comme il est facile de s'en rendre compte.

La tension résultante de la corde serait toujours égale à zéro et les opérations à faire seraient précisément celles que l'on indique pour le maniement de l'électrophore, et celles qui ont lieu d'une manière continue dans toutes les machines d'induction électrostatique.

Il sera donc digne d'intérêt d'esquisser le fonctionnement de l'électrophore en particulier.

Électrophore.

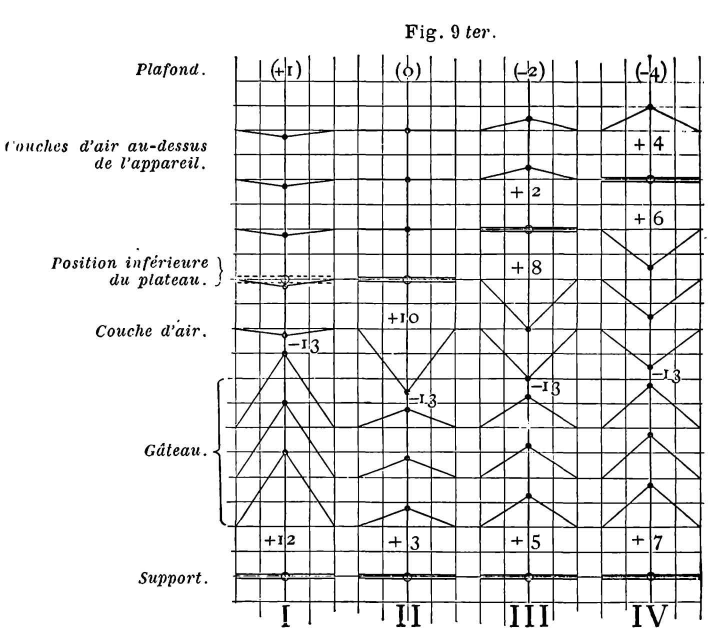
22. Le diagramme I de la *fig.* 9 *ter* montre le gâteau de résine excité négativement et disposé sur son support. La charge négative répartie à la surface est supposée égale à 13, sur lesquelles 12 sont, comme on dit quelquefois, retenues par le support et 1 est libre. En d'autres termes, la tension due à 12 unités de charge est supportée par les couches du gâteau, tandis que le reste est supporté par l'air au-dessus.

La tension dans l'air est petite, parce que l'épaisseur intéressée est beaucoup plus considérable que celle de la résine, — il y a tant de couches tendues qu'un faible déplacement de chacune suffit pour équilibrer la tension de la corde. (¹) Une unité de charge est induite sur le plafond et les murs de

(¹) Il faut bien remarquer que les brins correspondant à l'air sont plus raides que ceux qui correspondent à la résine. (*Note du Traducteur*).

la chambre par le gâteau électrisé. Nous posons maintenant le plateau métallique isolé sur l'électrophore. S'il a une épaisseur

Fig. 9 *ter*.



Fonctionnement de l'électrophore.

Les doubles lignes représentent les tiges rigides supportant les perles libres correspondant aux parties métalliques. Les perles liées aux brins élastiques correspondent aux diélectriques. La charge excitée par frottement sur le gâteau reste constante pendant toutes les opérations. Le support métallique est supposé relié aux parois et au plafond de la chambre; les chiffres entre parenthèses représentent les charges qui y sont induites. On n'a pas représenté toutes les couches d'air au-dessus de l'appareil; leur nombre doit être supposé tel que la tension du gâteau en I soit équilibrée.

I. Gâteau chargé, plateau enlevé ou en place, mais isolé.

II. Effet produit par la mise en communication du plateau et du support.

III et IV. Effet produit par l'éloignement du plateau; lorsqu'il est hors du champ et déchargé, on revient à l'état représenté en I.

sensible, il déplace quelques-unes des couches en tension, et par suite produit une légère tension supplémentaire sur les autres; mais cet effet est négligeable. Nous pouvons donc supposer que le plateau a une épaisseur nulle, et nous l'amenons à sa position la plus basse marquée sur le diagramme; la tension est transmise au travers, et rien n'est changé si ce n'est dans la couche dont il prend la place.

Le diagramme I représente ainsi l'état de choses tant que le plateau indiqué par les lignes pointillées reste isolé. Il n'entre pas en contact intime avec la masse de résine; une mince couche d'air, ou de la substance même du gâteau, le sépare de la surface chargée négativement, comme il est indiqué sur le diagramme. L'opération suivante consiste à relier le plateau et le support, ce qui amène l'état indiqué par le diagramme II.

Une charge de 9 unités a passé de la base au plateau, ce qui fait, avec celle qui existait primitivement sur les parois, une charge totale de 10 unités ([1]). La tension au-dessus du plateau est entièrement dissipée, et toute l'action a lieu intérieurement entre le plateau et le support.

La tension dans le gâteau est considérablement diminuée, mais la tension qui reste doit être équilibrée par la mince couche d'air comprise entre le gâteau et le plateau, couche qui est soumise par suite à une forte tension.

Soulevons maintenant le plateau isolé de nouveau. A mesure qu'il s'écarte, de nouvelles couches de diélectrique interviennent et supportent une partie de la tension. Il en résulte un triple effet; en premier lieu, la forte tension originale diminue; secondement, la tension dans le gâteau augmente, et enfin on produit ainsi une légère tension dans l'air au-dessus du plateau.

Le support prend par suite 5 unités de charge au lieu de 3, le plateau conserve sa charge de 10, mais une partie passe à la surface supérieure. La charge induite — 2 apparaît sur les parois de la salle. C'est ce qu'indique le diagramme III.

Le diagramme IV montre l'état atteint lorsqu'on continue à élever le plateau à l'infini, les charges en dessus et en dessous sont égales et égales à 5, le gâteau et le support ont repris leur état original I et sont prêts pour une nouvelle opé-

---

([1]) Si le support avait été isolé, et fut resté isolé tout en étant relié au plateau, cette unité de charge sur les parois y subsisterait; le plateau ne prendrait qu'une charge de 9 et la légère tension qui existe au-dessus de lui, et qui est indiquée en I, resterait telle quelle.

(*Note de l'Auteur*).

ration. Le plateau ayant maintenant une charge 10, les parois auront également une charge 10 et l'on peut les décharger sans affecter le gâteau. On peut alors répéter le cycle d'opérations ; si l'on ne décharge pas le plateau, les opérations sont ramenées de IV à II.

Il serait instructif de monter un électrophore sur un support isolé et de relier celui-ci à la terre par un galvanomètre sensible ; on vérifierait ainsi aisément le courant de charge lorsque le plateau est touché, et le courant de décharge lorsqu'il est élevé.

23. Il est encore un point qu'il est important d'expliquer, c'est l'effet produit par l'introduction, non plus d'un métal mais d'une couche d'un diélectrique parfaitement isolant ayant une capacité inductive différente, dans un milieu polarisé. Ainsi, insérons une mince plaque de verre entre les armatures d'un condensateur à air chargé. L'effet sera différent, suivant que les armatures sont chargées d'une quantité fixe d'Électricité, ou maintenues à une différence de potentiel invariable.

D'après le diagramme de la *fig.* 9 *quater*, les huit couches identiques sont supposées déplacées par une force électromotrice totale de 24 ; la tension de la corde s'accroît donc de 3 unités par couche. Le diagramme I indique cet état initial. Fixons la corde pour représenter une charge constante sur les plaques A et B et introduisons une plaque de verre, c'est-à-dire remplaçons les quatre couches du milieu par des brins élastiques d'une force moitié moindre (*voir* II). La tension dans la corde n'augmente plus que de 1,5 dans chacune de ces couches, et par suite la différence totale de potentiel, au lieu d'être égale à 24, n'est plus que de 18. Naturellement, la charge reste constante, et il n'y a pas de charge induite à la surface du verre : la capacité du condensateur entier a augmenté dans le rapport de 3 à 4.

Il n'y a pas de charge sur le verre, mais l'effet est le même, à peu de chose près, que s'il y en avait. L'effet sur la corde est le même que si les brins remplacés avaient même rigidité, mais que leurs perles aient glissé en arrière de moitié, dans les positions indiquées en III, où nous avons les charges superficielles

indiquées par les chiffres $1\frac{1}{2}$. Ceci, nous le répétons, *ne repré-*

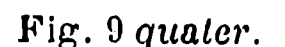


Fig. 9 *quater.*

Effets réels et apparents produits par l'introduction d'une plaque de verre entre les armatures d'un condensateur à air.

I. Condensateur à air d'une capacité égale à $\frac{1}{8}$.

II. Effet produit par l'insertion d'une plaque de verre ayant la moitié de l'épaisseur du diélectrique primitif, et dont la constante diélectrique est égale à 2. La charge reste constante, la tension tombe à 18, la capacité ayant augmenté de $\frac{1}{8}$ à $\frac{1}{6}$.

III. Effet apparent semblable produit par des charges superficielles fictives, la capacité inductive étant supposée partout la même.

IV. Effet dû à l'introduction de la même plaque de verre dans le cas où la pile reste reliée au condensateur; ici la charge augmente en même temps que la capacité.

V. État du milieu dans le même cas, dans la supposition des charges superficielles fictives.

sente pas l'état réellement produit par la présence du verre,

mais les effets sont tellement semblables qu'ils sont difficiles à distinguer; aussi parle-t-on fréquemment des charges *apparentes* ou *virtuelles* induites à la surface du verre pour indiquer les charges du diagramme III qui imitent si exactement les effets réels produits par l'état II.

Voyons maintenant le cas du potentiel constant.

Le diagramme IV montre l'effet produit dans ce cas par la substitution de quelques brins élastiques moins rigides. La force électromotrice est maintenue constante, en sorte que les brins les plus forts ont maintenant une tension plus élevée que tout à l'heure; aucune charge intérieure n'est possible, tant que le milieu est un isolant parfait, en sorte que toutes nos perles sont également déplacées.

La chute du potentiel est maintenant de 4 dans toutes les couches les plus rigides (air) et 2 dans les autres (verre), ce qui fait bien la f. e. m. totale de 24. Les charges sur les plaques A et B ont augmenté de $\pm$ 3 à $\pm$ 4 conformément à l'accroissement de capacité qui est encore de 3 à 4. Ici encore l'effet réel représenté par IV peut être simulé par des charges superficielles apparentes sans variation de la capacité inductive, comme on le voit sur le diagramme V, où tous les brins élastiques sont supposés de même force.

24. *Modèle hydraulique de la bouteille de Leyde.* — On peut également réaliser un modèle hydraulique qui met en lumière les mêmes phénomènes, quelques-uns d'une manière plus complète et plus directe que le modèle funiculaire.

Comme tous les phénomènes de charge sont identiques à ceux d'une bouteille de Leyde, c'est cet appareil que nous considérerons en particulier.

Pour réaliser ce modèle, nous emploierons un petit ballon en caoutchouc, dont le col est enfilé sur le tube à robinet *A* et qui est disposé à l'intérieur d'un ballon tri-tubulé (*fig.* 10). L'espace intermédiaire communique avec un tube à robinet *B*, et les deux espaces sont reliés par un troisième tube *C* fermé à l'ordinaire et qui n'est autre que le circuit de décharge; enfin deux tubes manométriques *a* et *b* représentent des électroscopes à boules de sureau; le tout est soigneusement rempli d'eau.

Les deux espaces pleins d'eau représentent les deux armatures et le ballon le diélectrique. Une pompe reliée à *A* remplacera la machine électrique, reliée à l'armature intérieure; dans ce cas, l'armature extérieure doit être reliée à un réservoir représentant la terre et il faut naturellement que la pompe aspire dans ce même réservoir, pour assurer la continuité du flux. Le ballon étant dans l'état naturel et le tout plein d'eau, le

Fig. 10.

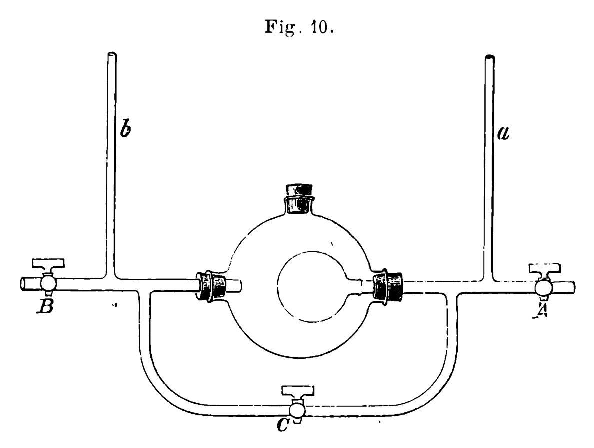


Diagramme d'un modèle hydraulique de la bouteille de Leyde.

niveau de l'eau dans les tubes correspond à celui qui règne dans le réservoir.

Le robinet *C* étant fermé ainsi que *B*, nous ouvrons *A* et faisons fonctionner la pompe : immédiatement le niveau des deux manomètres va monter également; nous chargeons une bouteille isolée, dans ce cas le potentiel des deux armatures croît également.

Mais si nous ouvrons *B* pour un instant, la pression s'abaisse et les deux manomètres tombent à zéro, du moins en apparence; toutefois, si nous répétons l'opération, on verra que tandis que *b* revient réellement à zéro, *a* s'en écarte chaque fois de plus en plus et que le ballon se distend. C'est la *charge par contacts alternatifs*. Avec la bouteille réelle, il faut envoyer une étincelle dans l'armature intérieure et en tirer une égale de l'armature extérieure; tant que cette étincelle n'est pas

soutirée, on ne peut continuer à charger, l'eau (et l'Électricité) étant incompressible.

Si B est maintenu ouvert tout le temps, la pompe peut fonctionner d'une manière continue, en distendant de plus en plus le ballon et en faisant monter le manomètre a, b restant au zéro (abstraction faite de faibles oscillations). La bouteille étant chargée, fermons A et enlevons la pompe, en reliant le tube A directement au réservoir. Nous pouvons maintenant, au moyen du tube intermédiaire C, faire passer le fluide d'un des vases à l'autre, de manière à supprimer l'état de tension et à ramener au même niveau les deux tubes manométriques.

Mais si l'on fait cette opération, la bouteille étant isolée, c'est-à-dire A et B étant fermés, le niveau commun des deux jauges ne revient pas au zéro, il indique une moyenne; c'est ce dont on peut s'assurer en touchant une bouteille de Leyde isolée lorsqu'elle vient d'être déchargée au moyen d'un excitateur.

Au lieu de relier directement les armatures par C, on peut opérer la décharge par contacts alternatifs; cette opération offre un intérêt tout particulier.

Le manomètre b étant au niveau zéro et a sous pression, ouvrons le robinet A ; une certaine quantité d'eau est chassée hors du vase intérieur et la pression en a tombe à zéro, mais la contraction de la membrane aspire le liquide du compartiment extérieur, et le manomètre b indique une *dépression:* les variations des deux niveaux dans les manomètres sont à peu près égales.

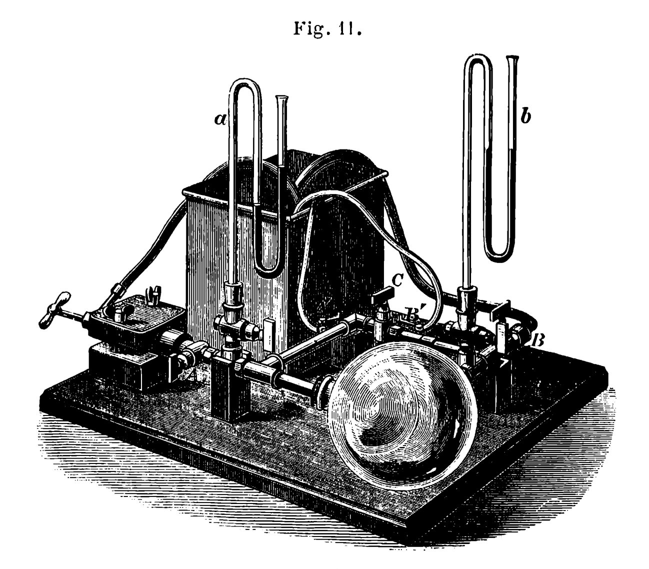
Fermons maintenant A et ouvrons B, un peu d'eau s'écoule du réservoir pour diminuer encore la tension du ballon, et les deux manomètres montent; b revient au zéro et a à peu près à sa position primitive.

Ouvrons B et fermons de nouveau A; de nouveau les deux manomètres baissent; renversons la manœuvre, ils remontent, et cela jusqu'à ce que le ballon ait repris son volume normal.

Ces opérations sont exactement l'image de ce qui se passe avec une bouteille chargée et isolée dont on met alternativement à la terre les deux armatures. Deux électromètres reliés à ces armatures indiquent alternativement des potentiels positifs et négatifs.

On reconnaît facilement les organes précédents sur les *fig.* 11 et 12 faites d'après des modèles existants ; on voit qu'on a ajouté deux robinets supplémentaires A et B', qui permettent de relier a directement au réservoir. Il est nécessaire que le

Fig. 11.



Modèle hydraulique de la bouteille de Leyde.

Le globe de verre renferme un ballon élastique qui se dilate lorsqu'on y pompe de l'eau ; le réservoir est rempli d'eau dont les niveaux correspondent au potentiel de la terre. Les manomètres à mercure correspondent à deux électroscopes reliés aux armatures.

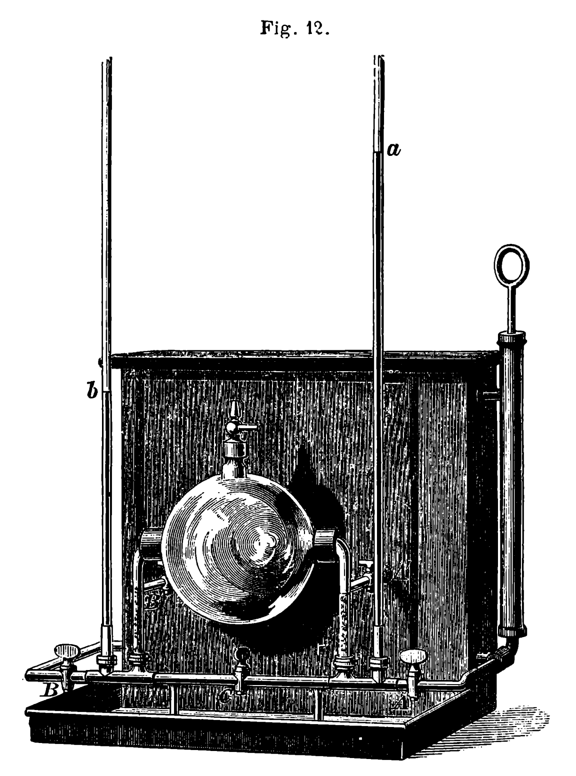
tout : ballon, tuyaux, réservoir et pompe, soit parfaitement rempli d'eau avant de commencer les opérations.

25. Nous avons insisté sur cette analogie hydraulique, parce qu'elle donne la clef d'une bonne partie de l'Électrostatique. Cependant cette analogie n'est ni complète ni parfaite ; néanmoins en combinant les résultats obtenus avec ceux que fournit le modèle à corde sans fin, et en se reportant à ce qui a été dit sur l'isolation et la conduction en général, on aura fait un progrès réel dans la connaissance de ces phénomènes.

Représentons-nous que les phénomènes électrostatiques sont produits par un fluide incompressible et présent partout,

pris comme dans une sorte de *gelée,* que les conducteurs jouent le rôle de tuyaux et les machines électriques celui de pompes; voyons dans les charges un excès ou un défaut de ce

Fig. 12.



Autre modèle hydraulique avec manomètres à eau.

La pompe est à piston plongeur, le haut du cylindre communiquant avec le réservoir pour permettre la circulation complète Les parties similaires sont désignées par les mêmes lettres que *fig.* 10 et 11.

fluide et dans les attractions l'effet de ses tensions, dans la décharge disruptive une rupture de ce milieu, et dans celle de la bouteille de Leyde une oscillation élastique durant jusqu'à ce que l'énergie soit dissipée. Cette manière de voir constituera une représentation bien plus réelle des phénomènes que l'ancienne théorie des actions à distance. Elle nous permettra de pénétrer

plus avant dans la nature intime de l'Électricité, bien que celle-ci puisse, à parler strictement, rester toujours inconnue.

Nous aurons de la sorte fait un pas en avant, mais disons-le, ce n'est qu'un pas et nous ne saurions dire quelles modifications et additions il faudra faire à la théorie exposée pour obtenir une explication complète des phénomènes électriques. Il y en aura sans doute beaucoup et d'importantes, mais n'oublions pas non plus qu'il n'est guère prudent de s'engager dans un dédale de phénomènes compliqués sans autre guide que de sèches équations mathématiques.

La théorie mathématique du potentiel et les recherches de cet ordre ont certainement amené des progrès réels, et permettent aux mathématiciens de se dispenser pour quelque temps de théories de l'Électricité et de représentations matérielles. Néanmoins il y a peu d'esprits capables de se passer de tout autre secours que celui du pur raisonnement, et une peinture mentale des phénomènes sera toujours utile, à la condition qu'elle soit suffisamment approchée de la réalité des faits.

C'est une représentation de ce genre que nous avons eu pour but d'esquisser et nous espérons qu'elle sera de quelque secours aux personnes toujours plus nombreuses qui veulent se familiariser avec l'Électricité.

DEUXIÈME PARTIE.

CONDUCTION (GALVANISME).

CHAPITRE IV.

CONDUCTION MÉTALLIQUE ET ÉLECTROLYTIQUE.

26. L'étude des phénomènes électrostatiques nous a montré qu'ils peuvent tous être compris et en partie expliqués en supposant que l'Électricité est un fluide parfaitement incompressible — un liquide parfait en d'autres termes — qui remplit tout l'espace et pénètre toute matière, et en supposant en outre que dans les corps conducteurs ce fluide peut se mouvoir librement, tandis que dans les substances isolantes et dans le vide, il est comme pris dans une masse gélatineuse élastique, aux tensions de laquelle les actions électrostatiques sont dues.

Ce milieu peut être rompu par une décharge disruptive, mais le flux régulier et continu ne peut avoir lieu que dans des canaux ou vides de ce milieu, qui sont constitués par les conducteurs, et ce flux s'effectue toujours dans des circuits fermés. Ce sont les conditions de ce flux que nous allons considérer dans les phénomènes dits de l'Électrodynamique, en faisant abstraction pour le moment des mouvements giratoires et de vibration.

Comment peut-on obliger de l'eau à se déplacer? De deux

manières seulement : en la pompant dans des canaux, ou en la transportant dans des vases. En d'autres termes, elle peut se déplacer *à travers* la matière ou elle peut se déplacer *avec* la matière. De même pour la chaleur qui peut se transmettre par *conduction* ou par *convection* et non autrement. On dit souvent, il est vrai, qu'elle peut être transmise par *rayonnement* ou *radiation,* mais dans ce cas il n'y a pas réellement un transport de chaleur. La chaleur dite rayonnante provient d'une dépense de chaleur en un point et celle-ci reparaît ailleurs, mais c'est la radiation qui rayonne et non la chaleur. Si l'eau était dissociée sur une planète en ses gaz constituants et recombinée sur une autre, ce n'est pas l'eau qui ferait le voyage, et le mouvement ne serait plus celui de l'eau. Celle-ci serait détruite en un point et reproduite en un autre, et c'est précisément ce qui se présente dans le cas de la chaleur rayonnante. Pour l'*Électricité* c'est encore la même chose; elle ne peut que se déplacer au travers de la matière ou avec la matière et non autrement.

Conduction dans les métaux.

27. Considérons d'abord la conduction. Relions les pôles d'une pile par un fil de cuivre, et représentons-nous le *courant.* C'est un véritable flux d'Électricité au travers des molécules du fil. Si l'Électricité est un fluide matériel, ce sera le transport de ce fluide; si l'Électricité est immatérielle, le courant ne sera pas un courant matériel, mais c'est certainement un transport d'Électricité, quelle que soit la nature de celle-ci.

En poursuivant l'analogie hydraulique, on peut se représenter le liquide coulant à travers ou entre les molécules du métal, ou encore transporté de l'une à l'autre continuellement. Quel est le mode réel? Nous n'en savons absolument rien, mais la dernière supposition est regardée comme la plus vraisemblable. Le flux peut être considéré comme une tendance continuelle à un état de tension semblable à celui des diélectriques combiné avec la disparition également continue de cette tension. Si l'on se représente les atomes comme de petits

conducteurs vibrant et se choquant mutuellement, de manière à transmettre une charge qu'ils peuvent posséder, alors la conduction électrique dans un milieu semblable pourrait s'opérer comme elle a lieu en réalité dans un métal.

Chaque atome prend une charge au précédent et la repasse au suivant et l'Électricité est ainsi transportée le long du fil. Mais ceci, bien entendu, n'est qu'un mode *possible* de conduction qui en ferait une sorte de phénomène électrostatique, un échange de charges entre une série de conducteurs. S'il existait réellement des particules en vibration et en collision, une charge fournie en un point se distribuerait rapidement à l'ensemble et le potentiel deviendrait bientôt uniforme; mais rien ne dit que les choses se passent ainsi dans la réalité, et ce n'est pas le mode le plus simple de représentation des faits. La représentation la plus simple et qui vient la première à l'esprit est de supposer qu'un fil conduit l'Électricité comme un tuyau rempli de sable conduirait l'eau, et elle suffit pour expliquer sinon tous les faits, au moins une certaine classe d'entre eux.

Laissant pour le moment cette question indéterminée, voyons ce que nous connaissons de certain sur le phénomène de la conduction dans les métaux. Nous savons :

1° Que le fil se réchauffe par le passage du courant;

2° Qu'il n'existe aucune tendance à des décharges en sens inverse, il n'y a pas de réaction élastique;

3° Que l'Électricité rencontre une résistance dans le genre des frottements;

4° Que cette force d'obstruction est exactement proportionnelle à la vitesse avec laquelle l'Électricité circule, soit à l'intensité du courant par unité de section.

28. Il est indispensable d'ajouter quelques mots en ce qui concerne ce dernier point. La quantité d'Électricité qui passe dans l'unité de temps à travers l'unité de section constitue l'intensité du courant [1]; et l'expérience prouve, comme Ohm

[1] On désigne souvent cette grandeur sous le nom de *densité* du courant, mais *intensité* est le mot propre dans ce cas. (*Note de l'Auteur.*)

l'avait supposé d'après l'analogie avec la chaleur, que cette intensité est exactement proportionnelle à la chute de potentiel qui produit ce flux; ou en d'autres termes (puisque l'action est toujours égale à la réaction), qu'un courant rencontre dans un conducteur une force électromotrice d'obstruction exactement proportionnelle à son intensité. Le rapport particulier entre les deux dépend de la nature du conducteur; cette constante doit se déterminer par l'expérience directe; c'est la *conductibilité spécifique* ou la *résistance spécifique*, suivant la manière dont on exprime la loi d'Ohm. Celle-ci, bien que ce soit l'une des lois les mieux établies, doit être considérée comme une relation empirique; on ne l'a pas encore expliquée, c'est un fait d'expérience. Sans aucun doute, elle est de la première importance, car elle établit un lien simple entre l'Électricité et la matière pondérable.

29. Si maintenant nous nous représentons cette force électromotrice antagoniste comme l'analogue d'une résistance de frottement, on n'a pas de peine à comprendre le dégagement de chaleur produit par le courant, et pourquoi ce dégagement est directement proportionnel à cette force et au courant, comme Joule l'a montré.

Mais si cette vague analogie ne nous satisfait pas, et si nous voulons nous représenter la nature intime de la chaleur et la manière dont elle est engendrée, nous pouvons revenir à la considération d'une multitude de particules en mouvement se choquant, et dont les vitesses représentent une certaine énergie moyenne correspondant à la température des corps.

Si maintenant une ou plusieurs des particules reçoit une impulsion, l'énergie du choc est répartie entre toutes les autres, et elles se meuvent plus rapidement, la température s'élève. Mais au lieu de donner un choc à l'une de ces particules, donnons-lui une charge électrique, ou mieux, plaçons dans sa sphère d'action un réservoir d'Électricité dont elle puisse tirer une charge chaque fois qu'elle vient en contact, et en même temps disposons en un autre point un réservoir de capacité infinie qui puisse absorber toute l'Électricité qu'il recevra. En réalité, il n'y a pas besoin de réservoirs infinis, il

suffit de relier deux réservoirs limités : les *électrodes*, avec un appareil quelconque qui puisse transférer l'Électricité de l'une à l'autre : une machine de Holtz ou une pile.

Quel sera le résultat du passage d'une série de charges électriques à travers l'ensemble des particules? On le voit de suite, le fait de recevoir une charge et de la transmettre tendra à accroître la vitesse originelle de chaque particule; la température s'élèvera. De cette manière, il est donc possible de concevoir comment le courant engendre de la chaleur. Néanmoins ce mode d'action ne peut être une représentation exacte des faits, car c'est essentiellement le mode de propagation du *son*. Le son se propage avec une vitesse déterminée et connue; c'est une perturbation mécanique qui se transmet de particule à particule, comme nous l'avons indiqué. Or, la chaleur étant certainement un mode de mouvement, doit également se comporter d'une manière analogue, et cependant sa propagation a lieu suivant des lois tout à fait différentes de la première. Aussi, bien que le mode exact de conduction de la chaleur soit inconnu, on ne peut guère douter que la circulation de l'Électricité dans les métaux ne s'en rapproche beaucoup; les deux phénomènes obéissent aux mêmes lois : ce sont tous deux des phénomènes de diffusion, régis par la loi d'Ohm (Fourier) et un métal bon conducteur de la chaleur l'est également de l'Électricité ([1]).

Conduction dans les liquides.

30. Laissons de côté pour le moment cette question difficile de la conduction dans les métaux, pour voir de quelle manière le flux d'Électricité a lieu dans les liquides. Par *liquides*, nous entendons particulièrement ici des composés chimiques

---

([1]) D'après les recherches de M. H.-F. Weber, il n'y aurait pas proportionnalité entre les deux pouvoirs conducteurs, mais leur rapport serait lié à la chaleur spécifique. M. Berget a également vérifié, dans ces derniers temps, que la proportionnalité n'est qu'approchée.

(*Note du Traducteur.*)

définis, tels que les acides, les bases, les sels et les solutions salines dans l'eau.

Quelques liquides, tels que l'alcool, la térébenthine, le sulfure de carbone et peut-être l'eau, ne conduisent absolument pas l'Électricité lorsqu'ils sont purs. Ces liquides doivent être rangés avec les gaz et sont des diélectriques plus ou moins parfaits.

D'autres liquides, comme le mercure, et en général les métaux en fusion, conduisent au contraire de la même manière qu'à l'état solide. Ce sont des *conducteurs métalliques*.

Par contre, la plupart des composés chimiques, liquéfiés, soit par fusion, soit par dissolution, ont un mode propre de conduction; ils constituent les *électrolytes* ([1]).

31. Dans l'état actuel de nos connaissances, on peut admettre avec une certitude presque complète les propositions suivantes :

1° La conduction électrolytique est invariablement accompagnée d'une décomposition chimique et n'a lieu que par suite de celle-ci.

2° L'Électricité ne s'écoule pas *à travers* mais *avec* les atomes matériels qui sont également transportés et transmettent leur charge à peu près à la manière des balles de sureau dans l'expérience de la décharge par contacts alternatifs.

3° La charge électrique afférente à chaque atome est un multiple simple d'une quantité déterminée d'Électricité, constante absolument indépendante de la nature du composé auquel appartient l'atome.

4° L'Électricité positive est transportée à travers le liquide par un processus équivalent au transport des atomes électro-positifs du composé dans la direction définie comme celle du courant; l'Électricité négative étant en même temps transportée en sens inverse par les atomes électro-négatifs.

5° Lorsque ces atomes atteignent une électrode, ou bien ils

([1]) Il faudrait encore faire une classe à part des *alliages*, qui constituent très probablement dans certains cas des combinaisons définies et qui, néanmoins, d'après les recherches de M. Chandler Roberts-Austen, ne subissent pas trace de décomposition électrolytique.

(*Note du Traducteur.*)

sont forcés d'abandonner leur charge électrique et, se combinant avec d'autres atomes de même nature, apparaissent en liberté : il y a décomposition visible ; ou bien ils peuvent rencontrer dans l'électrode ou dans le liquide une substance avec laquelle ils se combinent ; dans ce cas la décomposition, quoique réelle, est masquée et n'apparaît pas.

6° Dans d'autres cas enfin, il peut se faire que l'atome retienne sa charge avec une ténacité telle que le courant est arrêté. L'action exercée par ces atomes sur le courant constitue la *polarisation*.

7° Une force de ce genre ne se produit jamais dans la masse même de l'électrolyte, elle n'a lieu qu'aux électrodes.

32. Ces trois premières propositions renferment les *lois de Faraday sur l'Électrolyse*. Ces lois sont de la plus haute importance, et paraissent être rigoureuses. D'après la première qui est appelée *loi voltamétrique*, l'action chimique produite électrolytiquement dans une substance donnée est exactement proportionnelle à la quantité d'Électricité qui y a passé. Le terme vague d'*action chimique* désigne ici soit une décomposition ou recomposition, soit une libération ou un dépôt, soit enfin une dissolution ; bref, tout effet qui peut être produit soit dans les éléments, soit dans les combinaisons, par le passage du courant. Les poids des substances engagées dans la réaction mesurent les quantités d'Électricité qui ont passé ; une auge de décomposition peut donc servir de voltamètre, d'où le nom de *loi voltamétrique*. Son exactitude nous permet d'établir la première proposition ci-dessus, tandis qu'un grand nombre de faits qualitatifs relatifs à l'Électrolyse nous engagent à faire l'hypothèse indiquée immédiatement après.

La deuxième loi de Faraday est appelée *loi des équivalents électrochimiques* et indique que si plusieurs voltamètres sont parcourus par le même courant, pendant le même temps, la quantité d'action chimique dans chaque substance est proportionnelle à son *équivalent chimique ;* non pas à son poids atomique, mais à celui-ci divisé par ce qu'on appelle la *valence* ou l'*atomicité*, ou encore la *quantivalence*.

Ainsi un atome d'oxygène pèse 16 fois autant qu'un atome

d'hydrogène, et équivaut à deux de ceux-ci comme puissance de combinaison; d'après cette loi, 8 gr. d'oxygène sont libérés pour chaque gramme d'hydrogène; de même 108 gr. d'argent seront déposés dans un voltamètre à argent dans le même temps que 1 gr. d'hydrogène le sera dans un voltamètre à gaz parcouru par le même courant.

Cette loi signifie donc que le même nombre d'atomes monoatomiques sont libérés par une même quantité d'Électricité, quelle que soit leur nature; que cette quantité libère un nombre moitié moindre d'atomes diatomiques. Par suite, si nous admettons la deuxième proposition, que le courant passe par convection — chaque atome transportant de l'Électricité, — il s'ensuivra que chaque atome ou groupe monoatomique (H, Ag, NO^3) porte la même quantité d'Électricité, et que chaque atome ou groupe diatomique (Zn, O, Cu, SO^4) en porte une quantité double; chaque groupe triatomique, une quantité triple, et ainsi de suite. C'est ce qui est indiqué dans notre troisième proposition.

A la vérité, il est possible que chaque atome ait une *charge* spécifique propre dont il ne se sépare jamais, mais nous ne savons rien là-dessus; nous ne pouvons faire d'expériences que sur la charge dont ils peuvent se séparer aux électrodes. Cette quantité qui est la même pour tous les corps, à un multiple près, constitue, fait essentiel, la plus petite charge connue d'Électricité, c'est une unité naturelle. Cette unité a même été appelée quelquefois un *atome* d'Électricité et, peut-être, ce terme a-t-il une certaine signification dans ce cas. L'auteur a essayé de prévoir quelques effets qui résulteraient de cette hypothèse que l'unité de quantité d'Électricité est réellement une certaine grandeur définie, aussi indivisible qu'un atome de matière ([1]). Cette *unité naturelle* est extraordinairement petite, c'est environ la cent mille millionième partie de l'unité électrostatique C. G. S., ou moins d'un cent millionième de millionième de millionième de coulomb (10^{-20} coulomb.)

La charge de chaque *atome* étant si faible, leur potentiel

([1]) *Voir* le Mémoire sur *l'Électrolyse* (*Report of the British Association for* 1885, p. 763).

n'est pas élevé. Quelque chose comme 1 à 3 volts pourrait bien être la différence de potentiel de deux atomes chargés d'une manière opposée. Mais ils sont si rapprochés que même cette faible différence de potentiel cause une forte attraction électrostatique ou *affinité chimique* entre des atomes chargés en sens inverse. Cette force électrique entre deux atomes à une distance quelconque est dix mille millions de millions de quintillions de fois plus grande (10^{34}) que l'attraction due à leur *gravitation* à la même distance. Elle a une intensité par unité de masse (et par suite peut produire une accélération) environ un trillion de fois plus grande que celle de la gravité terrestre à la surface de la Terre. Cette force est certainement celle dont les chimistes s'occupent et qu'ils ont appelée depuis longtemps *affinité chimique* ([1]).

33. Mais si les atomes de chaque molécule sont liés entre

([1]) Il est aisé de calculer, comme l'a fait l'Auteur, la valeur de *l'atome d'Électricité,* dès que l'on admet comme connu l'ordre de grandeur des dimensions et des masses atomiques. Or, on sait que l'on peut assigner certaines limites aux grandeurs moléculaires, en considérant divers phénomènes, tels que la coloration des solutions, le dépôt de la plus faible couche appréciable sur une électrode, les couches doubles d'Électricité, etc.; mais ce sont surtout les considérations tirées de la théorie cinétique des gaz qui permettent de déterminer ces limites avec le plus de certitude.

C'est ainsi que Clausius indique comme distance moléculaire, pour les gaz à 0° C. et 760^{mm} de pression, 3×10^{-3} micron ou 3×10^{-7} centimètres, et $0,3 \times 10^{-7}$ comme diamètre moléculaire; on trouve alors que la masse d'une molécule d'hydrogène est de 30×10^{-25} grammes; un centimètre cube en contiendrait 37×10^{18}.

Les molécules de M. Lodge sont un peu plus petites, car il admet comme masse de l'atome d'hydrogène : $0,3 \times 10^{-25}$ (masse de la molécule $m = 0,6 \times 10^{-25}$; distance moléculaire à 760^{mm}, $\lambda = 0,8 \times 10^{-7}$).

La charge atomique se calcule alors immédiatement d'après la loi de Faraday, qui donne pour l'hydrogène, et pour les atomes monovalents :

$$e = 96\,000.0{,}3.10^{-25} = 0{,}3.10^{-20} \text{ coulomb},$$

puisqu'il faut 96000 coulombs pour libérer 1^{gr} de H ou $35^{gr},5$ de Cl, etc. Les autres nombres cités dans le texte se vérifient alors facilement, du moins quant à l'ordre de grandeur, ou pour divers poids atomiques, en se rappelant que 1 coulomb vaut 3×10^9 unités électrostatiques, et que la constante de l'attraction newtonnienne est égale à $0,7 \times 10^{-7}$ dans le système C. G. S.

On peut faire remarquer que la distance moléculaire admise par M. Lodge est du même ordre que celle que l'on pourrait déduire des expériences de M. Blondlot sur la capacité de polarisation voltaïque. Ce serait à peu près

eux par leur attraction électrostatique, on peut se demander comment il se fait qu'une force électromotrice, agissant sur un nombre énorme d'atomes, puisse les séparer et opérer la décomposition; en outre, la force électromotrice nécessaire pour effectuer cette décomposition ne devrait elle pas varier avec l'épaisseur de liquide entre les électrodes? Or elle n'en dépend pas. Cela prouve que dans toute la masse du liquide, les atomes ne sont pas séparés du tout. Probablement y a-t-il de fréquents échanges réciproques entre les molécules, les mêmes atomes ne restant pas toujours unis, mais se séparant quelquefois pour s'unir à d'autres. Durant ces échanges, il doit y avoir des moments de semi-liberté pendant lesquels les atomes sont sensibles à la moindre force directrice, et c'est probablement alors que la force électromotrice extérieure agit.

La nécessité d'admettre ces échanges moléculaires continuels s'est imposée aux chimistes pour expliquer les phénomènes de double décomposition, par exemple l'échange d'atomes entre des sels très stables lorsqu'on mélange leurs solutions fortement diluées, les échanges apparaissent d'une manière évidente lorsque les composés formés se trouvent être plus ou moins insolubles.

Cet état d'échanges continuels fait que les divers atomes ou groupes sont doués d'une sensibilité parfaite et que leurs mouvements migratoires sont susceptibles d'être dirigés, même par de très faibles forces, en sorte que la moindre force électromotrice agit sur ces atomes chargés, de manière à produire un déplacement moyen des atomes positifs dans le sens de la chute de potentiel, et des atomes négatifs en sens inverse.

Le fait qu'une force infinitésimale suffit pour produire la décomposition correspondante a été mis en lumière par les

la distance qu'auraient les ions libres dans une dissolution de HCl au $\frac{1}{1000}$ en poids, en supposant la dissociation complète (*voir* p. 58). A ce propos, l'Auteur aurait pu montrer que la loi limite des conductibilités moléculaires d'après laquelle la quantité d'Électricité qui passe par unité de section pour une chute de 1 volt est proportionnelle au nombre d'atomes et à leur charge électrique, constitue, lorsqu'on la rapproche de la loi de Faraday, un appui sérieux pour les hypothèses faites ci-dessus sur la nature de la conductibilité électrolytique.

(*Note du Traducteur.*)

expériences de *Helmholtz*. Quelquefois on emploie le mot de *dissociation* pour désigner cet état de liberté des atomes et cette faculté de se laisser diriger; dans l'explication primitive donnée d'abord par *Clausius*, l'idée d'une dissociation réelle était certainement impliquée. Il pensait que dans une solution il y a toujours des atomes à l'état libre qui se déplacent continuellement à la recherche d'autres atomes de polarité opposée; la force électromotrice était donc censé agir sur ces atomes non combinés, leur procession conduisant le courant. Mais nous voyons maintenant qu'en ajoutant l'idée d'une *double décomposition* et d'échanges moléculaires à l'hypothèse originale de *Grotthus*, on a une explication suffisante des faits, et qu'il suffit d'une dissociation virtuelle ou potentielle, d'un état momentané d'indécision, sans faire appel à une dissociation réelle et continue.

34. Essayons maintenant de nous rendre compte de la conduction électrolytique au moyen de nos analogies et modèles mécaniques.

Reportons-nous aux *fig*. 5 et 6 (p. 22 et 23) qui nous donnent l'image de la conduction métallique et de l'induction statique. Dans les deux cas, une force électromotrice extérieure produit un certain mouvement d'Électricité; mais, tandis que dans le premier cas c'est un mouvement continu ou un flux à l'état de régime qui se poursuit sans obstacle à travers ou entre les atomes de matière, dans le second ce n'est qu'un déplacement momentané auquel prennent part les atomes et auquel s'oppose une résistance qui n'est pas de la nature d'un frottement, lequel ne pourrait que retarder et non empêcher le mouvement, mais une résistance élastique qui s'oppose de suite à tout courant, qui est la cause de l'isolation, et qui enfin, lorsque la force extérieure n'agit plus, produit un mouvement inverse ou décharge.

Mais ce modèle est bien incomplet, car pourquoi les atomes sont-ils déplacés? Qu'est-ce qui prend la place du *levier* de cette représentation mécanique grossière? Ce ne peut être qu'une autre série d'atomes qui sont, ou bien maintenus en place, ou bien entraînés dans le sens opposé par un déplacement égal

et simultané d'Électricité négative, comme dans la *fig.* 7 *bis*. Nous devons nous représenter deux ou plusieurs séries de perles, enfilées sur des cordons de deux sortes, qui représentent alternativement de l'Électricité positive et négative, et qui sont déplacés simultanément en sens opposé par une force électromotrice.

Les perles enfilées sur l'un des fils ont, dans un diélectrique, une liaison élastique avec celles d'une rangée opposée, en sorte que le mouvement contraire du tout soit empêché; il ne peut se produire que de légers déplacements, suivis d'un retour élastique et d'oscillations, comme on l'a déjà indiqué.

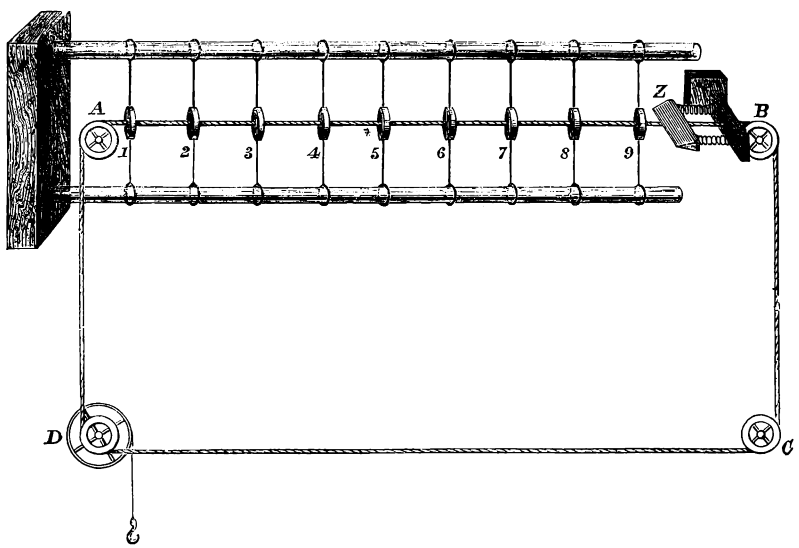
Cela étant, supposons maintenant que les liaisons élastiques entre les perles n'existent plus, et appliquons une force à chaque fil en déplaçant la moitié d'entre eux dans un sens et les autres en sens inverse; nous aurons une représentation de la conduction électrolytique. Les atomes ne sont plus liés entre eux, mais à leurs fils respectifs. Par cela, l'électrolyte diffère soit des diélectriques, soit des métaux.

De plus, la conduction électrolytique peut à peine être conçue comme une conduction réelle; l'Électricité ne se déplace pas à travers ou parmi les molécules, elle se déplace avec elles. Les constituants de chaque molécule sont libres vis-à-vis l'un de l'autre, et c'est par le mouvement d'atomes libres que le courant est transmis : c'est une convection, les atomes jouant le rôle de véhicules. Le mouvement libre d'atomes chargés est la caractéristique de l'Électrolyse.

35. Le modèle *fig.* 13 permet de comparer cette action à celle qui a été illustrée par les *fig.* 5 et 6. Les perles représentant une série d'atomes matériels sont fixées à la corde, sans qu'il puisse y avoir de glissement, mais elles n'ont pas d'autre liaison, on les a représentées suspendues librement à deux tiges de verre. La seule résistance au mouvement, à part un léger frottement, a lieu aux électrodes qui sont représentées par le couteau *Z* monté sur ressorts. Celui-ci peut obliger les perles à glisser sur la corde lorsque la force est suffisante, les ressorts sont alors bandés, ce qui représente la polarisation.

La partie du fil accompagnant chaque atome (c'est-à-dire la longueur entre deux perles) représente la charge atomique ; c'est une constante. Pour certains atomes, elle sera double, ce sont les atomes diatomiques des chimistes ; pour d'autres, elle est triple (atomes triatomiques), etc.

Fig. 13.



Modèle mécanique montrant quelques-unes des particularités d'un circuit en partie formé d'un *électrolyte*.

Si la corde représente l'Électricité positive, les perles qui y sont fixées représentent des atomes d'hydrogène ou tout autre *cation* qui se déplacent avec le courant vers la cathode. Une autre corde représentant l'Électricité négative peut être disposée à côté, avec des perles à une distance double représentant les atomes d'un *anion* diatomique, tel que l'oxygène. Si les cordes sont reliées mécaniquement, de sorte qu'elles doivent se déplacer également en sens inverse, nous représentons ainsi un grand nombre de faits établis : le nombre des atomes d'oxygène libérés en un temps donné sera la moitié de ceux d'hydrogène et par suite, à l'état gazeux, les volumes seront

dans le rapport de un à deux; pour chaque élément, le nombre d'atomes libérés en un temps donné est égal au nombre correspondant d'atomes d'hydrogène divisé par la *valence* de l'élément relativement à l'hydrogène.

Cette loi a été découverte par Faraday, elle paraît être rigoureuse, et, comme on connaît les poids relatifs des divers atomes, il est aisé de calculer le poids de chaque élément qu'un courant donné libèrera par heure, si nous déterminons expérimentalement cette quantité pour l'un d'eux.

Nous pouvons résumer comme suit les effets d'une force électromotrice sur les trois classes de corps :

Si l'on applique une force électromotice à un conducteur métallique, elle produit un flux continu avec dégagement de chaleur.

Si nous l'appliquons à un diélectrique, nous avons un flux momentané ou déplacement, et le résultat est l'énergie potentielle de la *charge*.

Si enfin nous l'appliquons à un électrolyte, nous avons de nouveau un flux continu avec décomposition chimique.

36. Il y a bien des points dans la conduction électrolytique qui seraient dignes d'attirer l'attention; considérons seulement les conséquences qui dérivent de ce qu'il y a un déplacement continu d'une série d'atomes chargés positivement dans un sens, et un déplacement inverse d'atomes chargés négativement.

Quoi que nous entendions par des charges positive et négative, il est certain que les atomes d'une molécule d'eau, par exemple, sont chargés, l'hydrogène positivement, l'oxygène négativement; il est presque certain en outre qu'ils restent unis par suite de l'attraction de leurs charges opposées. Il est certain aussi que lorsqu'une f. e. m., c'est-à-dire une cause capable de mettre l'Électricité en mouvement, agit sur le liquide, les atomes d'hydrogène le traversent tous dans une direction, et ceux d'oxygène en sens inverse. Les atomes peuvent être considérés comme mis en mouvement par leurs charges électriques, de la même manière que des balles de sureau chargées seraient déplacées; ces atomes agissent comme

véhicules de l'Électricité, qui autrement ne pourrait se mouvoir dans le liquide.

Chacune de ces deux séries se déplace jusqu'à ce que les atomes rencontrent quelque discontinuité, un nouveau liquide ou un conducteur solide. Dans un deuxième liquide, une nouvelle série d'atomes continue la convection, et l'on ne remarque rien de particulier à la limite; mais, avec un conducteur solide, le courant d'atomes doit s'arrêter : on ne peut avoir de transport d'atomes d'un corps solide. Cette obstruction peut mettre fin au transport et par suite au courant lui-même, ou bien, si la force est suffisante, elle peut mettre en liberté ces atomes qui se combinent entre eux, la charge étant cédée aux électrodes.

Mais il faut bien remarquer que nous avons un double courant. On ne peut obtenir de transport d'atomes positifs dans un liquide sans produire le transport des atomes négatifs correspondants. En d'autres termes, un courant électrique dans un liquide consiste nécessairement en un flux d'Électricité positive dans un sens, combiné avec un flux d'Électricité négative dans l'autre sens. Or, si cela a lieu ainsi dans un liquide, pourquoi le même phénomène ne se produit-il pas dans tous les cas? Il convient au moins de bien en concevoir la possibilité.

On connaît du reste un autre cas dans lequel un courant électrique est certainement la résultante de deux courants opposés des Électricités positive et négative: c'est celui des machines de Holtz. Lorsque cette machine est mise en mouvement avec ses électrodes réunies d'une manière quelconque, le disque de verre agit comme un porteur transférant une charge d'un peigne à l'autre à chaque demi-tour, mais s'il transporte de l'Électricité positive pendant la moitié de sa révolution, il transporte de l'Électricité négative pendant l'autre moitié. La partie supérieure du disque, qui marche en avant, est toujours positive (par exemple) tandis que la partie inférieure qui va en arrière avec une même vitesse est chargée négativement.

Dans ce cas, les vitesses sont nécessairement égales, mais non les charges. Dans le cas des électrolytes, ce sont les charges

qui sont forcément égales, mais non les vitesses. Chaque atome a sa vitesse propre de transport dans un liquide donné, quelle que soit la combinaison dont il ait fait partie. Cette loi a été établie par *Kohlrausch*. Ainsi l'hydrogène est transporté plus rapidement que tout autre corps, et la conductibilité d'un liquide donné dépend de la somme des vitesses des deux atomes correspondants et opposés. Les acides conduisent donc généralement mieux que leurs sels.

37. La Table suivante montre quelles sont les vitesses de migration des divers atomes à travers l'eau à peu près pure, lorsque la chute du potentiel est de 1 volt par centimètre ([1]).

	Centimètres par heure.
H	1,08
K	0,205
Na	0,126
Li	0,094
Ag	0,166
Cl	0,213
I	0,216
NO^3	0,174

([1]) Comme la théorie du transport des ions est moins connue en France qu'en Angleterre, nous croyons, à ce propos, devoir indiquer succinctement comment ces nombres ont été calculés, et surtout quel est leur rapport avec la conductibilité des solutions salines ou des acides étendus. Le lecteur qui désirerait des explications plus détaillées les trouvera dans un mémoire de M. Arrhénius où il a résumé les théories relatives aux solutions électrolytiques. Ce physicien explique l'anomalie que ces dissolutions présentent au point de vue de la loi générale des pressions osmotiques (Van't Hoff) en faisant l'hypothèse d'une dissociation progressive des molécules salines par l'eau. Le degré de dissociation pouvant se déterminer, soit par le rapport de la conductibilité à la conductibilité en solution infiniment diluée, soit par des phénomènes d'un tout autre ordre.

Si l'on admet que les ions se déplacent au sein de l'électrolyte avec des vitesses différentes u et v (Hittorf, Kohlrausch), la conductibilité spécifique qui est numériquement égale à la quantité d'Électricité qui traverse en une seconde l'unité de section, pour une chute de 1 volt, sera proportionnelle au nombre de molécules contenues dans l'unité de volume (soit à la *concentration*), et à la somme des vitesses des ions.

Si la concentration m est exprimée par le nombre de molécules par centimètre cube d'eau, u et v en centimètres par seconde, le facteur de proportionnalité sera 96200, puisque 1^{gr} d'hydrogène, ou $35^{gr},5$ de chlore, etc.,

correspondent à 96 200 coulombs, et que la conductibilité spécifique est donnée dans le système des unités pratiques.

On aura, λ étant cette conductibilité,

$$\lambda = m\alpha(u+v)\,96200;$$

α est le degré de dissociation, puisque seules les molécules dissociées prennent part à la conduction.

Si m_1 indique, comme cela se fait généralement, la concentration rapportée au litre, on aura

$$\lambda = m_1\alpha(u+v)\,96{,}2$$

Or on connaît le rapport des vitesses u et v par les expériences de Hittorf sur la variation de concentration aux électrodes (le rapport des vitesses est égal au rapport des *nombres* de Hittorf); on peut donc calculer u et v. L'Auteur paraît avoir fait ici une erreur de calcul, en négligeant une des constantes que nous avons introduites pour ramener à des vitesses absolues les nombres donnés par les auteurs allemands.

Ceux-ci, en effet, partent toujours de la formule de proportionnalité

$$L = m\alpha(u+v)$$

où L est le rapport de la conductibilité de la solution à celle du mercure.

En adoptant les nombres donnés par M. Ostwald, on trouve

H...........	$3{,}19 \times 10^{-3}$ centimètres par seconde.
Cl...........	0,68
K...........	0,65
Na..........	0,44

Au moyen de ces vitesses, on peut déduire la conductibilité d'une solution donnée; ainsi, pour le chlorure de sodium au $\frac{1}{100}$ ($0^{gr},585$ par litre) pour lequel α est égal à 0,93, on aura

$$\lambda = \frac{1}{100}\,0{,}93 \times 1{,}12 \times 96{,}2 \times 10^{-3} = 0{,}001$$

et

$$\lambda = 0{,}00119$$

pour le chlorure de potassium, ce qui est très voisin des nombres trouvés directement par Kohlrausch.

(*Note du Traducteur.*)

CHAPITRE V.

PHÉNOMÈNES ÉLECTRODYNAMIQUES.

Inertie électrique.

38. Si nous considérons d'une manière générale le courant électrique comme correspondant à un certain transport ou flux matériel, il devra très probablement présenter d'une manière ou d'une autre une certaine *inertie*, c'est-à-dire que son établissement ne peut avoir lieu que dans un temps fini et que, d'autre part, son arrêt, ne peut être que graduel, ou autrement il doit donner lieu à des efforts violents. C'est ce qui arrive pour une masse d'eau en repos dans un tuyau, ou en mouvement, et dans ce dernier cas on connaît les effets que peuvent produire ce qu'on appelle les *coups de bélier*.

On peut se demander s'il se présente quelque chose d'analogue dans les phénomènes électriques et, à première vue, on voit qu'il en est bien ainsi.

Un courant ne s'établit pas instantanément; il lui faut un certain temps, si court soit-il, pour arriver à sa valeur de régime, et, une fois établi, il tend à persister, en sorte que si le circuit est brusquement interrompu, il n'en est pas en général de même du courant, qui se fraye violemment un chemin à travers la couche isolante interposée, en dégageant de la chaleur. C'est cette impulsion du courant électrique qui est la cause de l'étincelle de rupture, et plus la rupture est brusque, plus est violente cette décharge.

Ces deux effets, le retard dans l'établissement du courant et l'énergie qui apparaît à la rupture, ont été longtemps désignés sous le nom d'*extra-courants;* aujourd'hui on les rapporte plutôt à l'effet de la *self-induction.*

Essayons de nous rendre compte plus exactement de leur signification; à première vue, ils semblent être une conséquence directe de l'inertie de l'Électricité, et il est bien certain que si l'Électricité était un fluide doué de masse, il présenterait précisément les mêmes effets, au moins pour un observateur superficiel.

39. Mais remarquons que si le courant avait réellement de l'inertie, comme un courant d'eau, elle se manifesterait non seulement par ses effets électriques, mais aussi mécaniquement. Une bobine suspendue délicatement devrait être soumise à un couple instantané chaque fois qu'un courant y serait excité ou interrompu; en outre, un courant continu lui communiquerait les propriétés d'un gyrostat ou d'une toupie, et il faudrait un travail déterminé pour dévier son plan.

Maxwell s'est préoccupé de cette question et a cherché s'il y avait en réalité une action de ce genre, mais sans réussir à la découvrir, et jusqu'à présent on n'a jamais observé dans un courant électrique quelque chose de semblable à une quantité de mouvement ou à une force vive se manifestant d'une manière purement *mécanique.*

Peut-on en inférer que le courant ne correspond pas à une certaine quantité de mouvement? nullement; on pourrait au contraire en conclure que le courant électrique consiste en réalité en deux flux égaux de directions inverses, en sorte qu'au point de vue mécanique leurs effets se neutralisent, tandis qu'électriquement, c'est-à-dire en ce qui concerne les phénomènes de self-induction ou d'extra-courants, leurs effets s'ajoutent.

L'absence d'une quantité de mouvement pourrait, d'un autre côté, provenir simplement de ce que les méthodes employées ne sont pas assez sensibles; enfin, et c'est peut-être là qu'est la vérité, il faut concevoir autrement et d'une manière moins simple le phénomène du courant lui-même, et le fait

qu'il semble présenter de l'inertie dans certains cas et pas dans d'autres. C'est ce que nous allons voir.

État du milieu dans le voisinage d'un courant.

40. Jusqu'ici, nous n'avons considéré le flux d'Électricité que comme un phénomène restreint seulement à l'intérieur du circuit conducteur, par analogie avec un courant d'eau où tout se passe dans le tuyau même. Or on connaît un grand nombre de phénomènes remarquables qui sont en contradiction complète avec cette manière de voir. Il y a certainement quelque chose qui passe le long du conducteur parcouru par un courant; mais le phénomène n'est nullement *confiné* au conducteur, au contraire tout l'espace environnant y participe plus ou moins.

Les faits de cet ordre n'ont, cela est évident, pas d'analogues dans l'hydraulique, et doivent être étudiés *suorum generum*. On peut les résumer comme suit :

1° Une aiguille aimantée située dans le voisinage d'un conducteur parcouru par un courant est déviée d'une manière permanente.

2° Deux courants électriques s'attirent ou se repoussent suivant qu'ils sont ou non de même sens.

3° Un circuit dans lequel un courant circule tend à s'étendre, de manière à embrasser une aire de plus en plus grande.

4° Un circuit électrique placé dans un champ magnétique tend soit à s'étendre, soit à se rétrécir ou à tourner sur lui-même, suivant sa position relative.

5° Des conducteurs placés dans le voisinage d'un courant qui varie, présentent une perturbation électrique momentanée.

6° La même chose a lieu dans le cas où le courant est constant, lorsque c'est la distance qui varie.

7° Les effets de self-induction peuvent être presque entièrement supprimés en tordant sur lui-même le conducteur isolé, siège du courant, ou même en disposant le circuit en deux

branches placées côte à côte; au contraire, on les augmente en faisant embrasser au circuit une aire étendue, ou mieux, en l'enroulant sur lui-même en bobine fermée, et en y insérant un noyau de fer.

Rien de semblable ne peut être observé avec un courant matériel, et ces faits prouvent que l'effet du courant électrique s'étend bien au delà du fil conducteur.

41. Ces divers phénomènes ont été presque tous découverts par Ampère et Faraday et constituent d'après ce dernier l'*induction* (*current induction*).

D'après les idées de Faraday, le milieu diélectrique environnant un circuit électrique est dans un état de tension; il est le siège de forces, exactement comme cela a lieu dans le cas d'un corps chargé d'Électricité.

Celui-ci donne lieu aux tensions électrostatiques et celui-là aux tensions électromagnétiques ou électrodynamiques.

Mais, tandis que les phénomènes électrostatiques n'ont lieu que dans le milieu, les conducteurs formant de simples solutions de continuité à la limite desquelles apparaissent ce qu'on appelle les *charges,* alors que leur masse même n'est soumise à aucune force par suite de l'effet d'écran de celles-ci, dans les phénomènes électromagnétiques il n'en est plus de même. Ceux-ci se produisent aussi bien dans la masse des conducteurs que dans le milieu diélectrique.

C'est ce que prouve le fait que la conductibilité croît dans le même rapport que la section; l'échauffement en tous les points d'un conducteur parcouru par un courant le prouve également, ainsi que la décomposition des électrolytes.

Mais, d'un autre côté, les faits non moins manifestes des attractions électrodynamiques et de l'induction prouvent que les effets du courant ont lieu également dans tout le milieu, et que leur intensité dépend de la nature de celui-ci; nous sommes donc mis en garde contre cette idée qui consisterait à assimiler les effets de self-induction à l'inertie pure et simple de l'Électricité en mouvement dans le conducteur, comme cela a lieu dans le cas de l'eau se déplaçant dans un canal ou un tuyau.

Nous sommes donc amenés à expliquer autrement ces effets, et cela de la manière suivante : Puisque les molécules du diélectrique sont reliées d'une manière inséparable à l'Électricité, et se déplacent avec elle, il est bien possible que l'Électricité elle-même n'ait pas d'inertie du tout, mais que ce soit la masse des molécules diélectriques déplacées en même temps qui donne lieu à cette inertie apparente.

Cette apparence se présente, par exemple, dans les décharges oscillatoires d'une bouteille de Leyde, car ce fait d'une oscillation des deux côtés de la position d'équilibre, jusqu'à ce que toute l'énergie emmagasinée se soit dissipée, est caractéristique de l'inertie; on peut donc concevoir que les phénomènes de self-induction s'expliquent d'une manière semblable, quoique moins simple. Nous reviendrons du reste sur ce point dans la troisième Partie.

Énergie du courant.

42. Nous venons de voir que l'espace voisin d'un circuit électrique est un champ de force dans lequel plusieurs des propriétés les plus importantes du courant, les propriétés magnétiques, se manifestent. Mais, dès que l'on cesse de considérer seulement les conducteurs et la source du courant, une question curieuse se pose. Devons-nous regarder le courant électrique comme produit dans le conducteur par une sorte de poussée ou de pression aux extrémités, comme c'est le cas pour l'air ou l'eau, forcés dans un tuyau par un piston ou l'appel d'un ventilateur? Ou devons-nous, au contraire, nous le représenter comme entretenu par des forces latérales, une sorte de frottement, comme cela a lieu pour l'eau entraînée à la surface d'un récipient par un courant d'air, ou par les aubes de roues qui y plongent? Ou bien, en nous reportant à notre modèle à corde (*fig.* 5, 6 et 13), devons-nous nous représenter l'action de la pile localisée en un point, ou, au contraire, faut-il imaginer quelque mécanisme qui communiquerait son effet à un grand nombre de points du circuit?

Le professeur Poynting a montré, d'après les idées de Maxwell, que la seconde de ces suppositions, bien qu'elle paraisse d'abord la plus compliquée, est cependant celle qui correspond à la réalité. Il a pu même calculer la voie par laquelle l'énergie est transmise de la pile aux divers points du circuit, dans quelques cas simples.

Nous devons donc soigneusement distinguer entre le flux de l'*Électricité* et celui de l'*énergie électrique;* ils n'ont pas du tout lieu par la même voie. Ici l'analogie hydraulique, au moins l'analyse élémentaire, tombe. Quand un fluide sous pression circule dans un tuyau, le fluide et l'énergie correspondante suivent le même chemin. Du travail est dépensé à l'un des bouts de la conduite pour y forcer le fluide, il se propage le long du tuyau, et réapparaît, comme travail, à l'autre extrémité. Avec l'Électricité, il en est tout autrement. L'énergie électrique ne peut être considérée comme absorbée à une extrémité du fil conducteur et récupérée à l'autre; l'Électricité circule bien ainsi (quelle que soit la signification réelle de cette circulation d'Électricité), mais il n'en est pas de même de l'énergie.

La pile transmet son énergie non au fil directement, mais au milieu environnant; celui-ci subit une perturbation et des tensions, et cette tension se propage d'un point à l'autre jusqu'à ce qu'elle atteigne le fil où elle est dissipée. D'après M. Poynting, la fonction du fil serait de dissiper l'énergie qui se transmet par les tensions du milieu, et qui, sans lui, finiraient par s'équilibrer, en sorte que le milieu ne propagerait plus rien du tout. C'est seulement par cette dissipation continue d'énergie, qui apparaît sous forme de chaleur dans le fil, qu'une propagation continue est possible.

L'énergie fournie par une dynamo ne passe pas au moteur par l'intermédiaire du fil qui les relie, mais par l'air. L'énergie d'une pile en relation avec un câble transatlantique ne nous arrive pas d'Amérique par l'âme de ce câble, mais par le diélectrique. Quelque paradoxale que semble cette proposition, elle paraît cependant fondée. Ainsi, quand nous voyons une voiture entraînée par un câble souterrain sur laquelle elle s'agrippe, comme cela a lieu dans les rues de Chicago, il est

évident que l'énergie du moteur fixe est transmise à la voiture par le câble et le grappin en fer qui les relie, et tous deux doivent être suffisamment solides pour résister à la traction motrice; au contraire, dans le cas des tramways électriques à conducteurs aériens ou souterrains, ou des ponts roulants de l'Exposition, l'énergie transmise ne l'est ni par le conducteur ni par l'appareil de prise de courant, quel qu'il soit; elle se propage de la dynamo génératrice à travers l'air. Une petite partie, il est vrai, se communique au conducteur et s'y dissipe, mais c'est réellement l'énergie du milieu qui est transmise et utilisée. Nous reviendrons également sur ce point dans la troisième Partie.

Phénomènes relatifs à l'état variable du courant.

43. Un fait remarquable relatif aux courants d'intensité variable, qui a été mis en relief par les travaux théoriques de lord Rayleigh, sir W. Thomson, et particulièrement par les expériences du professeur Hughes, c'est que le courant ne varie pas également et simultanément en tous les points de la section d'un conducteur, mais passe de l'extérieur à l'intérieur.

Cet effet est naturellement d'autant plus prononcé que le fil est plus épais; il se produit spécialement avec les conducteurs en *fer* et l'on en verra la raison dans la troisième Partie, mais la cause générale dans le cas de conducteurs non magnétiques s'explique tout naturellement quand on part des idées dont nous venons de parler.

Car, puisque le courant n'est pas excité et propagé par une force appliquée à un bout, de manière à lui faire surmonter les obstacles en vertu d'une quantité de mouvement propre combinée avec une *vis a tergo*, mais qu'il est entretenu en chaque point par la force nécessaire pour surmonter la résistance locale, et que cette force latérale provient du diélectrique environnant, il est évident qu'elle agit d'abord sur les couches extérieures du conducteur et n'atteint les parties centrales que par l'intermédiaire de celles-ci.

44. Pour illustrer ce fait, considérons un verre plein de liquide et ayant un mouvement de rotation; le liquide commence à se mouvoir par l'entraînement des couches extérieures, comme le fait voir une poudre en suspension, et ce n'est qu'après un certain temps que toute la masse participe au mouvement. De même à l'arrêt, le mouvement du liquide s'amortit en suivant la marche inverse.

Si le liquide est fortement visqueux, comme de la glycérine, le mouvement se communique très vite; ceci correspond à un médiocre conducteur. S'il est au contraire très fluide, la propagation interne est lente, cas d'un bon conducteur. Si le liquide était un fluide parfait, il correspondrait à un conducteur parfait, et aucun mouvement ou courant n'y pourrait être communiqué, à part celui de la couche limite.

Considérons maintenant un tube sans fin, très long et plein d'eau, par exemple un tore, et faisons-le tourner autour de son axe; le liquide participe peu à peu au mouvement, mais c'est par suite d'une force latérale et non d'une poussée de fond, et le mouvement commence par les couches extérieures. Il en est de même dans un conducteur électrique; si le fil est mince, ou sa substance mauvaise conductrice, le courant s'établit à peu près simultanément en tous points; mais si les dimensions transversales sont relativement considérables et si le corps est bon conducteur, les filets extérieurs du courant peuvent s'établir sensiblement avant les autres. Si le fil était infiniment conducteur, le courant ne pénétrerait pas du tout [1].

---

[1] Cette notion de l'inégale répartition du courant dans la section d'un gros conducteur, d'où résulte une augmentation réelle de résistance, a déjà pénétré dans la pratique, depuis que sir W. Thomson a donné des résultats numériques à ce sujet. La première étude complète sur cette question a été publiée en 1886 par lord Rayleigh dans le *Philosophical Magazine*.

C'est naturellement dans le cas d'oscillations électriques très rapides que cet effet est le plus marqué, et comme nous l'avons déjà dit, on peut réaliser de véritables écrans électromagnétiques, même avec nos conducteurs imparfaits, à la condition d'avoir des périodes assez courtes. M. Stefan, à la suite des expériences de Hertz, a étudié la distribution du courant dans ces conditions, et a montré que, dans certains cas, elle était la même que celle de l'Électricité statique. (*Comptes rendus de l'Académie de Vienne.*) La distribution dans un système de conducteurs parcourus par des cou

Dans les cas ordinaires de l'expérience, le temps nécessaire pour l'établissement du courant dans tous les points d'une section est excessivement court, quelque chose comme le millième de seconde, en sorte que la seule manière de mettre cet effet en relief est de renverser le courant un grand nombre de fois par seconde.

45. Si l'on faisait osciller autour de son axe et très rapidement le tore dont nous parlions tout à l'heure, on verrait facilement que les couches extérieures du liquide seules prendraient un mouvement de va-et-vient; l'eau des filets centraux resterait immobile, en sorte qu'il pourrait sembler que le tube renferme bien moins d'eau qu'il n'y en a en réalité. C'est comme si le vide intérieur était diminué. Il en est de même dans le cas du courant électrique alternatif; la section du fil est virtuellement diminuée, en ce qui concerne la conductibilité, et il présente par suite une plus grande résistance : il s'échauffe davantage avec un courant alternatif qu'avec le courant continu correspondant. Cet effet est cependant très faible en pratique, excepté pour de gros conducteurs et des alternances très rapides.

En séparant le conducteur en un grand nombre de fils isolés, ce qui permet au diélectrique de venir en contact avec une surface bien plus considérable de métal, la force agit sur un plus grand nombre de points et cet effet en est réduit d'autant.

On arrivera au même effet en laminant le conducteur cylindrique en un ruban plat. En employant un conducteur creux, on n'a que l'avantage de diminuer les parties non utilisées, mais le diélectrique à l'*intérieur* ne prend aucune part à la transmission de l'énergie, elle n'a lieu que par l'*extérieur;* si, par contre, on fait passer le fil de retour par l'axe, comme cela a lieu pour l'âme des câbles télégraphiques, toute l'énergie se transmet par le diélectrique intermédiaire, l'extérieur

---

rants de cette nature est déterminée par la condition que l'énergie électromagnétique du milieu soit un minimum, tandis que pour les courants constants c'est l'énergie dépensée dans les conducteurs qui est minima, comme Kirchhoff l'a démontré.

(*Note du Traducteur.*)

n'est influencé en rien; ici, comme pour l'Électricité statique, l'expression *milieu extérieur* doit donc être employée avec circonspection; c'est en réalité la couche diélectrique qui sépare les deux parties d'un circuit.

46. Nous voyons par ce qui précède que, tandis que pour les courants constants, la section des conducteurs et leur nature entrent seules en jeu, le cas est bien différent pour les courants alternatifs à inversions nombreuses, tels que les courants téléphoniques, ou encore les décharges d'une bouteille de Leyde ou la foudre.

Dans ces divers cas, il convient d'employer des conducteurs ayant de grandes surfaces de contact avec le milieu propagateur, le diélectrique, si l'on veut réellement utiliser toute leur section.

Un conducteur de paratonnerre et même sa tige ne doivent pas être formés d'un câble rond ou d'une barre cylindrique, mais d'un ruban plat ou d'un câble formé de torons aussi écartés que possible les uns des autres.

47. Il convient de dire ici que le fer constitue un conducteur de beaucoup inférieur au cuivre pour des courants alternatifs rapides; au moins en est-il ainsi pour des courants de périodes moyennes, par exemple dans le cas de quelques centaines ou d'un millier d'alternances par seconde, comme cela a lieu dans les machines dynamos et les courants téléphoniques. Mais, fait singulier, lorsque la rapidité des oscillations est beaucoup plus grande, comme cela se présente dans le cas des décharges de bouteilles de Leyde ou pour la foudre, le fer est à peu de chose près aussi bon que le cuivre, parce que le courant est réellement confiné aux couches tout à fait superficielles du conducteur, en sorte que la nature de la masse n'entre plus en jeu.

Inertie électrique.

48. Nous pouvons maintenant revenir sur cette question, à savoir si le courant électrique possède ou non une certaine quantité de mouvement, comme un courant matériel. Les lois

du courant électrique, la forme des lignes de flux en un mot, indiquent ou bien qu'il n'y a pas d'inertie, ou bien qu'il n'y a pas de résistance; or la loi de Ohm montre en tout cas que dans la conduction métallique il y a une résistance, un *frottement*. Il semble donc au premier abord qu'il ne doive pas y avoir d'*inertie*.

La forme des lignes de flux entre en jeu comme suit à ce

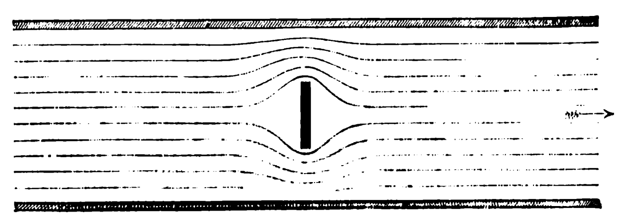
Fig. 14.

Lignes de flux d'un fluide circulant dans un tuyau et rencontrant un obstacle.

point de vue : si un obstacle est interposé sur le parcours d'un courant matériel, le mouvement de l'eau ou du gaz n'est pas symétrique des deux côtés de cet obstacle. Les lignes de courant sont divisées par ce dernier, et il donne lieu en arrière à des tourbillons (*fig.* 14).

Au contraire, si l'on interpose un obstacle au courant élec-

Fig. 15.



Lignes de flux électriques au droit d'un obstacle.

trique, par exemple par une petite section transversale, les lignes de flux sont parfaitement symétriques des deux côtés comme c'est indiqué *fig.* 15; c'est ce qui aurait lieu du reste si l'eau était dépourvue ou d'inertie ou de viscosité.

49. Ce raisonnement est-il concluant? Ne prouve-t-il pas

l'absence d'une quantité de mouvement propre à l'Électricité ? Non, car il est possible d'expliquer autrement le fait, et cela de la manière suivante : Supposons que le mouvement de l'eau, au lieu d'être produit par une cause qui n'est pas voisine de l'obstacle, et qui n'y est pas localisée, puisque c'est sa propre force vive qui l'oblige à tourner celui-ci et qui occasionne le mouvement tumultueux en aval, supposons, disons-nous, que le mouvement soit produit par une force agissant en chaque point de la trajectoire, et capable de surmonter la résistance de frottement afférent à chaque élément de celle-ci. Alors le mouvement de l'eau se fera suivant des lignes de flux symétriques et semblables à celles de la *fig.* 15.

Il est facile du reste de trouver un exemple de *mouvement* de ce genre ; prenons une pièce de fil ou de tôle de cuivre, et chauffons-la légèrement, puis plaçons-la dans une atmosphère d'air enfumé au repos ; on verra alors, en l'éclairant vivement, et à l'aide d'une lunette, que les lignes de courant du gaz qui s'échauffe à son contact ont la forme de celles de la *fig.* 15, parce que la force motrice a son siège à la surface même du métal et non pas en amont. On ne peut dire, il est vrai, dans ce cas, que le gaz est soumis en *chaque* point à la force voulue, mais cela est juste pour les points critiques où la résistance de frottement se produit, et l'analogie est suffisante.

En résumé, la forme des lignes de flux (*fig.* 15) permet non pas deux, mais trois alternatives : 1° le fluide *électrique* ne rencontre pas de résistance de frottement, 2° ou bien il n'a pas d'inertie, ou bien encore 3° la force motrice agit en chaque point de la trajectoire. Il suffit que l'une de ces hypothèses soit juste pour expliquer les lois du courant électrique, et les deux autres points restent indéterminés. Or, d'après l'interprétation que M. Poynting a donnée de la théorie de Maxwell, c'est la troisième hypothèse qui est juste : l'Électricité est mise en mouvement en tous points de sa trajectoire ; par suite, la question d'inertie doit être considérée comme non encore tranchée.

CHAPITRE VI.

PRODUCTION DU COURANT PAR LES FORCES CHIMIQUES ET THERMIQUES, CONDUCTION DANS LES GAZ.

Pile voltaïque.

50. Nous aurons peut-être à revenir sur cette manière singulière d'envisager la question lorsque nous aurons étudié les phénomènes de la troisième classe, mais, pour le moment, essayons de nous rendre compte de la manière dont une pile ordinaire ou un élément thermo-électrique peut produire un courant.

Si nous admettons l'existence d'une attraction chimique, d'une nature inconnue, entre les atomes de substances différentes, on peut facilement s'expliquer l'action de la pile. Nous avons en premier lieu le liquide qui contient, par exemple, des atomes d'hydrogène et d'oxygène libres ou virtuellement libres, c'est-à-dire réellement dissociés, ou au moins qui s'échangent si fréquemment de molécule à molécule que la direction de leur mouvement peut être modifiée et guidée par une force directrice très faible. Chacun des atomes, à l'état libre, possède une certaine charge d'Électricité, l'hydrogène ayant une certaine charge positive et l'oxygène une charge négative double. Dans ce liquide nous plongeons une couple d'électrodes qui attirent différemment ces atomes : par exemple du cuivre et du zinc qui tous deux attirent l'oxygène,

mais le second plus fortement que le premier; ou bien, du zinc et du platine, celui-ci n'ayant pour ainsi dire pas d'action sur l'oxygène, ou mieux encore, du peroxyde de plomb et du zinc, dont l'un attire l'hydrogène et l'autre l'oxygène.

Immédiatement, les atomes d'oxygène libre vont se mouvoir du côté du zinc et ceux d'hydrogène vers le plomb.

51. Lorsque nous disons que les électrodes attirent les atomes, il ne faut pas entendre par là qu'elles exercent une action sur toute la masse : tout ce qu'il est nécessaire de supposer, c'est qu'elles agissent sur les atomes qui viennent dans *le champ d'action* des surfaces ; la distance qui y correspond est naturellement fort petite, de l'ordre du dix-millionième de millimètre. Lorsque le zinc a attiré les atomes d'oxygène de cette couche infiniment voisine et s'est combiné avec eux, ils sont immédiatement remplacés par ceux des couches successives, par diffusion de proche en proche. Il y aura donc une progression continue des atomes d'oxygène vers le zinc, la vitesse de celle-ci dépendant de la force motrice et de la vitesse de diffusion particulière à chaque liquide. Tous les atomes qui arrivent au zinc neutralisent une partie de son Électricité par celle dont ils sont chargés, en sorte qu'il sera rapidement électrisé positivement à un degré suffisant pour annihiler son pouvoir attractif sur les atomes d'oxygène chargés de la même manière, et toute action s'arrêtera. Mais si l'Électricité peut s'écouler à mesure, en réunissant le zinc au cuivre par un fil conducteur, le circuit est complet, l'Électricité revient sur son chemin par le fil et la progression continue dans le liquide. L'Électricité ainsi fournie au cuivre ou au platine neutralise la répulsion que cette électrode pouvait exercer sur les atomes d'hydrogène chargés négativement, en sorte que ceux-ci viennent également y céder leur charge, se combinent entre eux et sont mis en liberté à l'état gazeux.

Sans aller au fond de toutes les particularités du phénomène, cette représentation rend compte au moins de quelques-unes des propriétés principales des piles.

52. Si, au lieu de deux électrodes différentes, nous em-

ployons des plaques de *même nature*, il faudra qu'elles soient électrisées en sens inverse d'une manière quelconque, pour produire la double progression en question, en maintenant le courant à travers le liquide : c'est le cas du *voltamètre*.

En partant de ce fait connu que les atomes sont chargés, Helmholtz évite cette nécessité d'admettre l'existence d'une force chimique (non électrique) entre le zinc et l'oxygène, en supposant que tous les corps ont une affinité élective pour l'Électricité elle-même, attraction qui est plus forte pour le zinc que pour tout autre métal usuel, le cuivre par exemple.

Helmholtz suppose donc que le zinc attire non plus l'oxygène, mais sa charge atomique ; de la sorte, la pile se rapproche davantage du voltamètre. La *polarisation*, ou force contre-électromotrice qui agit à l'électrode où se produit le dégagement d'hydrogène, s'expliquerait alors par l'affinité de l'hydrogène pour l'Électricité négative et par la répugnance que ces atomes auraient par suite à abandonner leur charge.

La force de contact de Volta.

54. Il convient d'ajouter à cette explication des phénomènes de la pile quelques mots au sujet du mode de production des charges électriques qui apparaissent sur des plaques de zinc et de cuivre amenées au contact.

L'explication de ce fait est très simple, bien que cette question ait donné lieu à d'interminables controverses.

Des plaques de zinc et de cuivre au contact de l'air sont exactement dans les mêmes conditions chimiques que si elles étaient plongées dans l'eau acidulée. La seule différence est que l'air est isolant tandis que l'eau acidulée est conductrice.

Tant que les deux plaques ne se touchent pas, rien ne se passe dans les deux cas, parce que les actions chimiques sont identiques sur la surface entière des deux plaques, et bien que l'attraction du zinc pour l'oxygène soit très considérable, il est impossible qu'il se combine avec un grand nombre d'atomes en prenant leurs charges négatives, car il sera bien-

tôt si fortement électrisé que la répulsion électrique l'emportera sur l'attraction chimique. Il y a donc un état d'équilibre qui s'établit immédiatement.

Mais, dès que le contact électrique a lieu entre les deux métaux, il n'y a plus d'oxygène en ce point et un libre passage est ouvert à l'Électricité, du zinc au cuivre.

Si donc il n'y a pas quelque force électromotrice à leur jonction, et tout porte à croire qu'il n'y a réellement *aucune* force sensible, il se produit immédiatement un flux d'Électricité négative du zinc au cuivre ou d'Électricité positive en sens inverse.

Ce qui se passe ensuite dépend de la différence entre l'air et l'eau au point de vue de la conductibilité, c'est-à-dire de la présence des atomes implicitement dissociés, nécessaires à la conduction électrolytique ; ils existent dans l'eau, mais non dans l'air. Par suite, dans le cas de l'eau, la charge électrique est continuellement transportée du cuivre au zinc par une procession d'atomes d'oxygène qui sont continuellement attirés vers le zinc et se combinent avec lui comme nous l'avons expliqué. Dans l'air, au contraire, il ne se passe rien de plus, si ce n'est une légère tension électrostatique produite par l'Électricité accumulée à la surface des métaux et qui ne peut s'en échapper. Ordinairement ces charges sont extrêmement faibles, la force électromotrice qui les produit étant généralement inférieure à 1 volt, et par suite la tension électrostatique dans l'air tout autour d'un couple zinc-cuivre est minime. Néanmoins, en suspendant une légère aiguille d'aluminium fortement chargée dans le voisinage d'un tel couple, sir W. Thomson a réussi à observer cet état de tension, l'aiguille se dirigeant vers le cuivre lorsqu'elle est chargée positivement. La méthode usuelle employée en premier lieu par Volta pour rendre ce phénomène apparent consiste à augmenter la capacité du système en amenant au contact deux plaques soigneusement polies. Bien que la force électromotrice soit petite (exactement la même que s'il n'y avait qu'un point de contact), la capacité est assez grande pour qu'une quantité notable d'Électricité s'accumule dans les deux plaques séparées par une couche d'air et qui ne se touchent que par

quelques points, en sorte que lorsqu'elles sont nettement séparées la tension augmente assez pour affecter un électroscope à feuilles d'or.

55. La confusion qui a été faite, et que l'on fait encore fréquemment au sujet de cette expérience qui n'a pas réellement une importance fondamentale, est de regarder les charges comme l'effet d'une force électromotrice particulière au point de contact qui donne lieu à une différence de potentiel entre les deux métaux ; on explique alors la pile voltaïque par l'action de cette force électromotrice fictive de contact.

La seule explication correcte est de considérer d'abord la pile, et d'expliquer chimiquement son action aussi bien qu'on peut le faire à présent et de conclure que le même phénomène doit se produire dans l'air (qui forme avec les métaux une pile à air), avec cette différence que ce corps étant un diélectrique au lieu d'être un électrolyte, aucun courant continu n'y est possible, mais seulement un déplacement électrique.

56. La cause réelle du phénomène dans les deux cas est la plus grande affinité de l'oxygène pour le zinc que pour le cuivre. Elle donnerait lieu à une plus grande tension de l'Électricité négative dans le sens du zinc, une traction de la corde négative dans le cas de notre modèle, et par suite, à une augmentation du potentiel négatif. Une lame de zinc isolée est, on le sait, de 1,8 volt environ au-dessous du potentiel de l'air ambiant. La même chose a lieu pour le cuivre, mais moins fortement, comme cela doit être d'après la différence des chaleurs de formation de CuO et de ZnO; une lame de cuivre isolée sera de 0,8 volt environ au-dessous du potentiel de l'air.

Dès que les deux métaux sont en contact, ils prennent nécessairement le même potentiel (toutes les parties d'un conducteur sont au même potentiel tant qu'il n'y a pas de forces perturbatrices intérieures) et l'égalisation du potentiel est effectuée par un flux d'Électricité au travers de la jonction, ce qui amène sur le cuivre une charge positive et sur le zinc une

charge négative telles que leur potentiel soit égalisé. Dans l'air, cette égalisation a lieu en un instant; dans l'eau, elle durera indéfiniment : c'est la seule différence. Ce qu'on observe dans l'effet de Volta, ce n'est pas une différence de *potentiel* entre le zinc et le cuivre, mais une différence de *charge*, les deux métaux étant chargés de telle manière que leur potentiel soit uniforme.

Ce que l'on observe également dans l'expérience de sir

Fig. 15 *bis*.

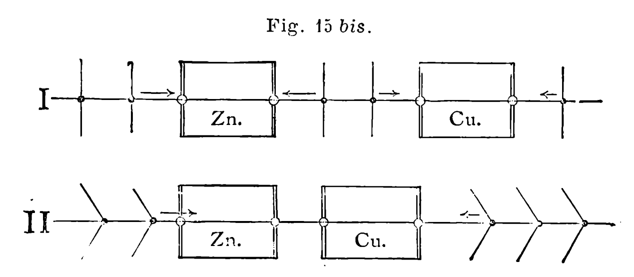


Diagramme de l'effet Volta dans le modèle funiculaire.

1. Indique l'état d'une plaque de cuivre et d'une plaque de zinc avant le contact; le fil représente l'Électricité négative, les perles les atomes d'oxygène, et les flèches indiquent que ceux-ci sont attirés, mais avec des forces inégales par les deux métaux.

II. Indique l'effet produit par l'expulsion des atomes intermédiaires d'oxygène et l'établissement du contact métallique; l'attraction atomique supérieure du zinc pour l'oxygène peut maintenant se manifester, et doit être équilibrée par le déplacement électrique. La surface du zinc est maintenant chargée positivement (la longueur correspondante du fil négatif est moindre que la longueur normale). Le cuivre est chargé positivement. C'est l'effet Volta.

W. Thomson, n'est pas non plus une différence de potentiel entre le cuivre et le zinc, mais une chute de potentiel dans l'air voisin, dans le sens du zinc au cuivre. Une fois en contact, ces métaux sont tous deux à un potentiel commun de 1,3 volt en dessous de celui de l'air, la moyenne de leurs potentiels initiaux; mais la différence originelle de potentiel entre chacun d'eux et l'air reste invariable, en sorte qu'il y a une chute graduelle du potentiel de 1 volt entre la couche d'air au contact du zinc et celle qui est au contact du cuivre. C'est cette chute de potentiel qui agit sur l'aiguille de l'électromètre. Le diagramme de la *fig.* 15 *bis* pourra peut-être rendre la chose plus claire.

Forces réelles de contact.

57. Jusqu'ici nous avons supposé qu'il n'y avait réellement *aucune* force de contact entre le zinc et le cuivre. En fait, il n'y a pas de force notable, mais elle n'est pas absolument nulle. Entre certains métaux tels que le bismuth et l'antimoine, par exemple, cette force est plus grande, quoiqu'elle ne soit encore que de quelques centièmes de volt. Mais le fait important, c'est qu'il puisse y avoir de réelles forces de contact entre deux métaux, seulement elles n'ont rien à faire avec la force chimique qui produit l'effet de Volta. Si ce dernier effet peut être rapporté à une force de contact, elle est due au contact entre l'air et le métal ; toute force réelle de ce genre entre deux métaux n'agit que comme une légère perturbation de l'effet de Volta, et ce qu'on observe est, en réalité, la somme des deux.

58. Le fait qu'il existe une force de contact réelle bien que faible est prouvé par l'effet calorifique réversible qui se produit au contact de deux métaux quand un courant y passe : un courant dans un certain sens donne lieu à une plus forte production de chaleur qu'un courant de sens inverse.

Dans un métal homogène, la chaleur produite par un courant est absolument indépendante de sa direction, c'est ce qu'on appelle la *chaleur irréversible* qui est proportionnelle au carré du courant, comme Joule l'a montré. Mais, à la soudure de deux substances différentes, ou même à la jonction de deux parties du même corps à deux états différents (à des températures différentes, par exemple) il y a, en outre de la chaleur produite par la simple résistance, de la *chaleur réversible*, de telle sorte qu'un courant d'un sens déterminé tend à refroidir la soudure au lieu de l'échauffer.

Dans certains cas, on pourra faire que cette absorption de chaleur masque l'effet de la chaleur irréversible, en sorte que la soudure pourra se refroidir par le passage d'un courant dans

le sens voulu. Ce curieux effet a été découvert par *Peltier*.

On peut le considérer comme le fait fondamental de la Thermo-électricité. Il prouve qu'il y a, à la jonction des métaux, une force électromotrice qui agit dans le sens du courant, qui produit du travail par conséquent, et qui utilise pour cela la chaleur propre de ceux-ci.

Le mouvement vibratoire des molécules tend, dans ce cas, à produire le déplacement de l'Électricité. Si le courant est renversé, il circulera à l'encontre de l'action des molécules et une certaine quantité de chaleur sera produite et s'ajoutera à la chaleur irréversible.

59. Cette preuve thermique de l'existence d'une force de contact, quoique la plus directe, n'a pas été remarquée en premier lieu. Le phénomène thermo-électrique le plus anciennement observé est la production d'un courant électrique dans un circuit hétérogène dont on maintient les parties constituantes à des températures différentes, ce qui provient manifestement de ce que ces forces de contact varient avec la température, les unes augmentant, les autres diminuant. Elles s'équilibrent exactement dans un circuit à température uniforme. Mais il y a une certaine force résultante lorsque la température n'est pas uniforme, résultante qui produit les courants découverts par *Seebeck*.

Pile thermo-électrique.

60. Nous pouvons nous représenter comme suit un élément thermo-électrique; néanmoins, nous devons avouer que cette représentation laisse subsister quelque chose de vague et d'abstrait.

Lorsque l'Électricité se déplace à travers ou dans les molécules des conducteurs métalliques, avons-nous vu, elle rencontre une résistance ou force antagoniste qui est exactement proportionnelle à la vitesse. En d'autres termes, il y a entre l'Électricité et la matière une relation analogue à celle qui

existe dans la viscosité des liquides. De là suit que, si un atome matériel est soumis à un mouvement vibratoire autour d'un point fixe, il tendra à entraîner avec lui l'Électricité dans son mouvement de va-et-vient. Mais, comme il y a une infinité de ces actions dont les phases sont discordantes, il n'en résulte aucune propulsion dans un sens déterminé.

Tel est l'état où se trouve un corps solide à une certaine température; si, pour une cause ou pour une autre, une série de ces atomes viennent à se déplacer avec une vitesse plus considérable dans un sens que dans l'autre, ce mouvement dissymétrique tendra à produire un courant continu dans un sens, celui où les vitesses ont la plus grande valeur absolue, par le seul fait que la force d'entraînement exercée est proportionnelle à la vitesse.

Or, partout où il y a une conduction de chaleur dans un sens déterminé, les atomes se trouvent dans ces conditions. Ils sont animés dans un sens, *en avant*, d'une vitesse qui diffère infiniment peu, mais qui diffère de leur vitesse *en arrière*, parce que l'action des atomes du côté le plus chaud l'emporte sur celle des atomes du côté froid. Une chute de température cause donc une tendance à un entraînement : il naît une force électromotrice dans les divers points d'un conducteur inégalement chaud.

Ce fait fut prévu théoriquement par sir W. Thomson qui vérifia expérimentalement l'exactitude de ses idées.

61. Mais ce n'est pas seulement à la limite d'un corps chaud et d'un corps froid qu'il y a une telle force, il y a une force du même genre à la jonction de deux substances quelconques de nature différente, même lorsque la température est uniforme. Il n'est pas aussi facile dans ce cas d'expliquer pourquoi les atomes doivent se mouvoir plus rapidement dans un sens que dans l'autre; cependant les deux cas ne sont pas très différents, eu égard à l'état de tension qui doit régner nécessairement à la limite de deux milieux. Quoi qu'il en soit, il est certain qu'une force électromotrice existe à tout contact de ce genre.

Ainsi, dans un circuit formé de deux métaux, si les soudures

sont à des températures différentes, il y a quatre forces électromotrices : une dans chaque métal, de la partie chaude à la partie froide ou *vice versa*, et une à chaque soudure ; le courant qui s'établira dépend de la résultante de ces quatre actions.

Électricité de frottement.

62. Les forces de contact n'ont pas seulement lieu entre métaux : elles se produisent également entre les isolants, et c'est à ces forces que sont dus les effets puissants de toutes les machines électriques à frottement. C'est par le contact que les Électricités se portent d'un côté ou de l'autre, et si un frottement violent est nécessaire pour produire cette séparation, c'est à cause de la mauvaise conductibilité de ces corps.

Mais remarquons que, si cette liaison entre la matière et l'Électricité qui constitue la résistance et que régit la loi d'Ohm est suffisante pour donner lieu à des forces électromotrices de contact, on conçoit que ces forces soient si faibles dans les bons conducteurs, tandis qu'elles ont une valeur très élevée avec les isolants où cette liaison est si particulièrement forte.

Chaleur spécifique de l'Électricité.

63. Les métaux diffèrent entre eux par cette affinité, et, généralement parlant, le meilleur conducteur donne le plus mauvais corps thermo-électrique. Un mauvais conducteur comme l'antimoine, ou mieux la galène, le sélénium ou le tellure, constitue un élément thermo-électrique bien plus énergique qu'un métal bon conducteur. Mais ce n'est pas seulement la résistance spécifique qui entre en cause dans ce cas, il y a également une affinité propre entre chaque métal et les deux Électricités. Ainsi le fer est un métal dont les atomes semblent avoir plus d'affinité pour l'Électricité positive que pour l'Électricité négative, en sorte que le courant va, dans le

fer, des parties chaudes aux parties froides. Le cuivre agit au contraire de la même manière sur l'Électricité négative, et c'est le courant négatif qui passe des parties chaudes aux parties froides. Tous les métaux peuvent être classés dans ces deux catégories, excepté peut-être le plomb qui paraît avoir la même affinité pour les deux Électricités, et par suite n'exerce aucun effet différentiel.

Pyro-Électricité.

Certains cristaux, appelés hémiédriques par les minéralogistes et qui ont des formes différentes aux deux extrémités de leurs axes, que nous désignerons par A et B, possèdent également des propriétés différentes dans le sens AB et dans le sens BA. On peut plus facilement les rayer, par exemple, dans un sens que dans l'autre. De pareils cristaux, dont la tourmaline est le type, ont d'autres propriétés singulières. Quelques-uns d'entre eux, qui paraissent parfaitement transparents, sont opaques pour la lumière polarisée dans certains plans; ainsi ils sont opaques pour des vibrations perpendiculaires à l'axe, tandis qu'il n'y a qu'une légère absorption pour les vibrations qui ont lieu dans le sens de l'axe. Cette opacité semble absolument différente de l'opacité des métaux qui provient de leur conductibilité et dont nous parlerons plus tard, parce que, en premier lieu, la lumière n'est pas réfléchie mais absorbée, et qu'en outre la tourmaline est un isolant presque parfait. Mais, vis-à-vis de son pouvoir conducteur, il est encore d'autres particularités dignes de remarque et qui pourraient bien être intimement reliées à cette opacité relative qui fait qu'une plaque de tourmaline parallèle à l'axe peut servir de *polariseur* en optique. Une de ces particularités (découverte par l'auteur et par M. S. P. Thompson), est que, comme cela a lieu pour tous les cristaux uniaxes, la conductibilité thermique dans le sens de l'axe n'est pas égale à celle qui a lieu normalement (dans le cas de la tourmaline, elle est beaucoup moins élevée dans le sens de l'axe); en outre,

un cristal qui s'échauffe conduit beaucoup mieux la chaleur dans le sens BA que dans le sens AB, tandis que le contraire se produit pour un cristal qui se refroidit.

Or la même chose a lieu pour l'Électricité, soit que cela provienne des inégalités de température, soit pour une raison plus directe. Par suite, lorsqu'un cristal s'échauffe, l'Électricité positive s'accumule à l'extrémité A et l'Électricité négative en B. Tant que la température reste constante, rien ne se produit plus, si ce n'est les pertes ordinaires qui ont lieu principalement à la surface et qui peuvent masquer le phénomène. Si maintenant on refroidit ce cristal, une électrisation en sens inverse sera produite, et si aucune perte n'a eu lieu, l'effet du refroidissement rétablira l'équilibre.

A température constante du cristal, il n'a pas été possible à l'auteur d'observer la moindre différence de conductibilité suivant le sens, et il en est de même pour la conductibilité thermique. Les deux effets dépendent des variations de température.

Transmission de l'Électricité dans les gaz.

64. Il nous reste à voir quelques-unes des particularités du transport ou de la transmission de l'Électricité dans *les gaz*.

La première chose à noter, c'est qu'il n'y a pas de véritable conduction électrique dans les gaz ou les vapeurs ; en d'autres termes, les corps dans cet état paraissent se comporter comme des isolants parfaits, et ce sont peut-être les seuls. Même la vapeur de mercure n'a pas la moindre conductibilité. Ceci nous montre que le simple bombardement moléculaire, comme on se le représente dans les gaz, n'est pas suffisant pour transmettre ou pour emporter une charge électrique.

Le mode le plus ordinaire suivant lequel l'Électricité traverse les gaz, en laissant de côté le transport mécanique par un véhicule solide, est celui de la décharge disruptive. Essayons de nous rendre compte d'un peu plus près de la manière dont ce phénomène se produit.

En premier lieu, puisque les molécules gazeuses, comme

celles de tout fluide, peuvent se déplacer librement, on est conduit à se demander pourquoi il n'y a pas d'électrolyse dans les gaz comme dans les liquides.

Dans ces derniers, deux conditions semblent nécessaires pour l'électrolyse :

1° Il faut que les atomes ou les radicaux qui forment les molécules soient chargés des Électricités opposées, et 2° ils doivent se trouver (par dissociation ou autrement) dans un état tel, qu'un échange continu d'atomes ait lieu de molécule à molécule, en sorte qu'une force très faible ou infinitésimale puisse produire une procession d'atomes dans une certaine direction.

Puisqu'un gaz ne se comporte pas comme *électrolyte*, il faut que l'une ou l'autre de ces conditions, ou même les deux ne soient pas remplies. Ou bien les atomes d'une molécule gazeuse n'ont pas de charge propre, ce qui est assez plausible pour les éléments gazeux, ou bien les atomes appartenant à une telle molécule y restent individuellement attachés et ne s'échangent pas de l'une à l'autre.

Lorsque nous disons qu'un gaz ne se comporte pas comme un électrolyte, c'est en nous appuyant sur ce fait d'expérience qu'une tension électrostatique finie peut certainement exister dans un gaz, et même une tension très élevée en réalité; en outre, lorsque cette tension dépasse la limite, le corps cède, non pas par un simple glissement ou en produisant un déplacement continu, mais par une rupture violente, due à ce que la ténacité d'un certain milieu est insuffisante. On peut donc se représenter les molécules d'un gaz situées entre deux électrodes maintenues à une grande différence de potentiel comme disposées en une série de chaînes parallèles allant de l'une à l'autre, et soumises à des efforts presque suffisants pour effectuer la dissociation. Il ne faut pas, du reste, se représenter les molécules prises individuellement comme conservant une position fixe, il peut y avoir un courant gazeux violent entre les deux électrodes; dans ce cas, toutes les molécules sont sous tension pendant leur passage dans le champ.

65. Si la chute du potentiel dépasse une certaine limite, qui

est de 33 000 volts par centimètre pour l'air atmosphérique, les molécules cèdent, les atomes chargés se précipitent sur les électrodes, et la décharge a lieu. Le nombre des atomes ainsi libérés et rendus capables de transporter une charge dans leur déplacement est si grand qu'on n'a jamais trouvé aucune difficulté à transporter ainsi une quantité quelconque d'Électricité. En d'autres termes, *pendant* la décharge, le gaz devient conducteur, et, conduisant par un transport d'atomes, il peut être rangé parmi les conducteurs électrolytiques.

Par contre, on ne saurait dire si la charge ainsi transmise par chaque atome lui appartient intrinsèquement, ou bien si elle est communiquée aux parties composantes de la molécule par la mise en tension du milieu et la disruption. Ce que l'on appelle la *force diélectrique* d'un gaz (c'est-à-dire la tension qu'il peut supporter sans que la décharge disruptive se produise, et sans qu'il devienne ainsi conducteur pour un instant) dépend en partie de la nature du gaz et surtout de sa pression. Un gaz sous forte pression a une force électrique beaucoup plus considérable que sous les faibles tensions. On pourrait appeler les électrolytes ordinaires des diélectriques de force nulle.

Une des raisons pour lesquelles la pression influe sur la force diélectrique des gaz saute aux yeux ; ce n'est certainement pas la seule, mais on peut la tenir pour une *vera causa:* c'est le fait que, dans un gaz raréfié, il y a moins de molécules pour supporter la tension totale entre les électrodes.

Ainsi l'on sait qu'il faut environ 30 000 volts par centimètre pour produire la décharge disruptive dans l'air; par suite, 30 volts suffiront pour produire cet effet à une pression d'environ $\frac{3}{4}$ de millimètre de mercure, tandis qu'à la pression de 50 atmosphères il faudrait 1 500 000 de volts (¹).

(¹) La tension par unité de surface, ou l'énergie par unité de volume, est en réalité proportionnelle au *carré* de la chute de potentiel, et je n'attache pas d'importance au rapport simple supposé ci-dessus. Il y aurait du reste beaucoup à dire à ce sujet. (*Note de l'Auteur.*)

Le courant considéré comme une charge en mouvement.

66. Récapitulons un peu les faits que nous avons embrassés jusqu'à présent dans cet essai d'explication mécanique. Nous avons cherché en premier lieu à nous représenter la nature de la charge électrostatique et la fonction du diélectrique. Il s'agit maintenant de voir comment les phénomènes de l'Électricité dynamique peuvent être expliqués en se reportant à ceux de l'Électrostatique. Un courant, n'étant rien autre que de l'*Électricité en mouvement,* doit pouvoir être remplacé par la charge d'un corps animé d'un mouvement rapide. Chargeons une sphère de l'une ou l'autre Électricité et mettons-la en mouvement : nous réalisons ainsi un courant positif ou négatif dans cette direction. C'est tout ce qu'il faut pour expliquer les phénomènes. Un courant continu entre deux corps peut être maintenu au moyen de petites balles de sureau ou de particules oscillant de l'un à l'autre et transportant ainsi l'Électricité positive dans un sens, et l'Électricité négative dans l'autre. Mais de tels corps, en passant ainsi d'une électrode à l'autre, pourraient se rencontrer et leurs Électricités se combiner. Ils devraient être ainsi séparés électriquement de nouveau par leurs chocs avec d'autres, sinon le courant cesserait bientôt et l'on n'aurait plus qu'un milieu polarisé. Au lieu des balles de sureau, représentons-nous les atomes agissant de cette manière, nous aurons une image grossière de ce qui se passe d'un côté dans les électrolytes et de l'autre côté dans les diélectriques. Les propriétés des métaux et autres conducteurs solides sont plus obscures ; un transport par molécules ne peut y avoir lieu, mais, comme le courant ne produit dans ce cas aucun phénomène nouveau, il est naturel d'essayer de se représenter là aussi les choses d'une manière à peu près semblable ; c'est ce que nous avons essayé de faire à un autre endroit, mais avec un médiocre succès.

67. Nous avons dit qu'un courant électrique peut parfaitement résulter simplement du mouvement d'une *sphère*

chargée, et nous avons pu ainsi expliquer bien des choses relativement aux courants en discutant minutieusement les conséquences de cette hypothèse. Simplifié de la sorte, le problème est encore loin d'être facile; il n'y a pas seulement à considérer la charge mobile en question, mais aussi les charges opposées induites, qui sont reliées à celle-ci par des lignes de force (ou mieux par des tubes d'induction), et le système entier est en mouvement. L'effet de ce mouvement est en tout cas de produire un nouveau phénomène dans le milieu, une sorte de mouvement tourbillonnaire qu'on n'aurait pas pu prévoir de prime abord; d'où il résulte que deux sphères chargées de la même manière et en mouvement se repoussent l'une l'autre avec une force moindre que lorsqu'elles sont en repos, et elles peuvent même finir par s'attirer si la vitesse est assez grande; d'où résulte enfin une relation entre l'Électricité et le Magnétisme, car le corps chargé en mouvement dévie l'aiguille aimantée. Ce sont ces relations que nous allons étudier maintenant.

TROISIÈME PARTIE

MAGNÉTISME.

CHAPITRE VII.

RELATIONS ENTRE LE MAGNÉTISME ET L'ÉLECTRICITÉ.

68. Considérons les effets produits par un état de *rotation* de l'Électricité. Quelle action peut avoir un tourbillon d'Électricité?

Si nous enroulons en hélice un fil parcouru par un courant, nous trouvons qu'il agit comme un aimant : il exerce une action sur l'aiguille aimantée, il aimante l'acier et il attire de la limaille, qui sera aspirée à l'intérieur de l'hélice si le courant a une intensité suffisante. En un mot, c'est un aimant, non pas permanent mais temporaire, et dont l'existence est liée à celle du courant qui l'anime.

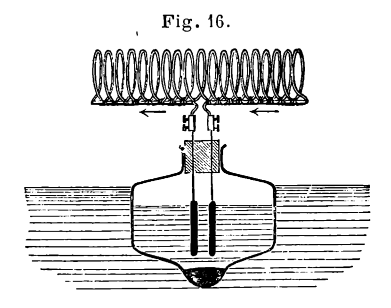
Cette expérience suggère l'idée que peut-être le Magnétisme provient d'un mouvement rotatoire de l'Électricité; c'est ce que nous allons voir d'un peu plus près.

En premier lieu, il faut noter que tous les effets produits par un aimant peuvent l'être également par un solénoïde parcouru par un courant. (La proposition inverse ne serait pas juste.) Si nous faisons flotter horizontalement un solénoïde relié à une pile, il va se placer de lui-même dans le méridien magnétique : nous avons réalisé une boussole. Si nous suspendons deux bobines, elles s'attirent et se repoussent exactement comme le feraient deux aimants.

69. Tant que nous ne considérons que les actions produites à une certaine distance du solénoïde, la forme de celui-ci importe peu; mais dès que nous considérons les actions en des points très voisins, il faut bien spécifier la forme de l'aimant que le solénoïde peut remplacer.

Si notre *bobine* a la forme d'une longue hélice cylindrique, comme dans la *fig.* 16, elle se comporte comme un aimant cylindrique de mêmes dimensions. Au contraire, si cette bobine forme un large anneau plat, elle remplace encore un aimant cylindrique, mais infiniment court, un disque, en un mot. Un

Fig. 16.



Pile et solénoïde flottants constituant une boussole.

disque ou une plaque d'acier aimantée de manière à avoir un pôle nord sur l'une de ses faces et un pôle sud sur l'autre peut remplacer une bobine plate, quelle que soit sa forme, à condition d'avoir le même contour. Il n'est pas du tout nécessaire que la bobine ait un grand nombre de tours de fil, si ce n'est pour augmenter son effet; un seul suffit, quelle que soit sa forme. En sorte que, si nous nous rappelons que tout courant électrique doit nécessairement avoir lieu dans un circuit fermé, nous concevons que tout courant électrique *est virtuellement une bobine d'une forme plus ou moins compliquée*, et par suite remplace un aimant d'une forme correspondante. Nous en concluons que chaque courant électrique doit présenter des phénomènes magnétiques; les deux sortes de phénomènes sont inséparables.

Il y a cependant un point pour lequel le disque aimanté et notre bobine ne sont pas équivalents, l'avantage, du reste,

étant du côté de la bobine, car elle possède une propriété que n'a pas l'aimant : son intérieur est pénétrable. Pour tout l'espace extérieur, ils se comportent identiquement; pour l'espace intérieur, au contraire, ils diffèrent. La bobine peut prendre en tout cas la place de l'aimant, mais celui-ci ne peut remplacer à tous les points de vue celle-là; s'il en était autrement, le mouvement perpétuel serait facile à réaliser.

70. Nous allons maintenant montrer et illustrer ce fait que le Magnétisme participe par certain point d'un mouvement de rotation, et que par sa nature il permet d'obtenir naturellement et facilement des effets de rotation, en disposant convenablement les choses. On ne pourrait pas l'observer au moyen de deux aimants, mais cela est facile en prenant un courant et un aimant et en étudiant leur action réciproque.

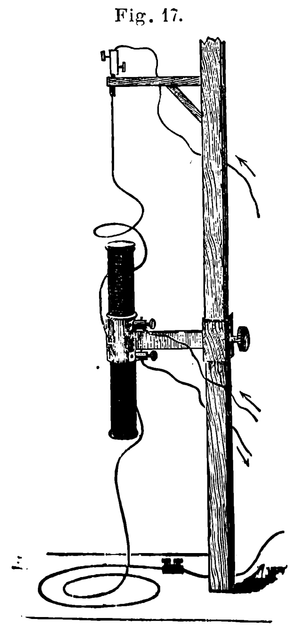
Un aimant possède, comme chacun sait, deux pôles, un pôle nord et un pôle sud, dont les propriétés sont précisément opposées; on peut, dans la plupart des cas, le considérer comme formé par ces deux pôles, et l'action d'un courant sur lui peut se ramener à la résultante de son action sur ceux-ci. Or, comment agit un courant sur un pôle magnétique? Deux courants s'attirent ou se repoussent; deux pôles s'attirent également ou se repoussent; mais un courant et un pôle exercent une action mutuelle qui n'est ni une attraction ni une répulsion : c'est un couple. Ils ne tendent ni à s'approcher ni à s'écarter, mais bien à tourner l'un autour de l'autre; singulière réaction, qui, à première vue, paraît unique en son genre. Toutes les actions et réactions entre deux masses ont toujours lieu dans la direction de la ligne qui les joint; les forces qui agissent entre un courant et un aimant agissent précisément à angle droit sur cette ligne.

Il y a déjà longtemps, en 1847, Helmholtz a montré que la loi de la conservation de l'énergie ne pouvait être juste que si les forces exercées entre des corps variaient d'une manière ou d'une autre avec leur distance, et agissaient suivant la ligne qui les joint. Nous avons maintenant un cas où cette condition n'est pas remplie, et par suite la conservation de l'énergie est remise en question : les deux corps vont tourner

indéfiniment l'un autour de l'autre. Voilà un beau champ ouvert aux chercheurs du mouvement perpétuel, qui n'ont pas manqué de s'y jeter. Et, en effet, si le courant pouvait seulement se maintenir sans qu'on dépensât de travail, le mouvement perpétuel serait réalisé. Du reste, après tout, ceci n'a rien d'extraordinaire, car on peut en dire autant de toute machine. Si nous considérons le pôle et le courant seuls, l'énergie *n'est pas conservée,* elle est dépensée indefiniment; mais si nous faisons entrer en ligne de compte la pile comme partie essentielle du système, le mystère disparaît, tout rentre dans l'ordre naturel.

71. La manière la plus simple peut-être de montrer la rota-

Fig. 17.



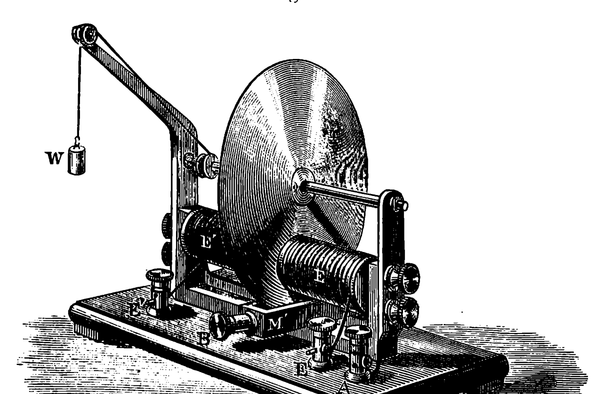
Conducteur flexible s'enroulant autour d'un puissant électro-aimant cylindrique.

tion d'un conducteur parcouru par un courant autour d'un pôle d'aimant, est de prendre une pièce de 2^m environ de ruban d'or, comme les officiers en portent sur leur uniforme, et d'y faire passer un courant aussi intense que possible en le

suspendant verticalement; approchons-en alors un barreau aimanté placé aussi verticalement, nous verrons immédiatement le ruban s'enrouler autour de lui en spirale, une moitié tournant autour du pôle nord du barreau, et l'autre moitié autour du pôle sud (*fig.* 17).

Si l'aimant était flexible et le conducteur rigide, ce serait le

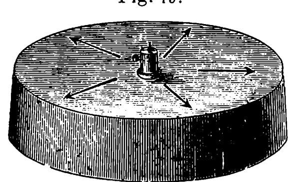
Fig. 18.



Disque de Faraday agissant comme moteur; le même appareil démontrant l'induction électromagnétique.

premier qui viendrait s'enrouler d'une manière semblable au-

Fig. 19.



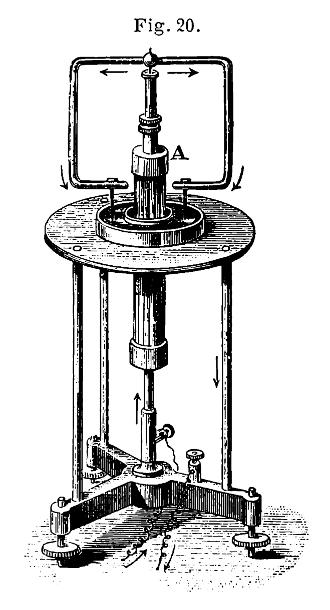
Disque horizontal muni de rebords plongeant dans un liquide et parcouru par des courants radiaux; un aimant placé en dessus ou en dessous, ou même le champ terrestre produit la rotation.

tour du second : cette action est strictement réciproque et mutuelle. Un aimant rigide mis en présence d'un conducteur

rigide ne peut plus indiquer que la résultante dernière de cet effet, il se met en croix et vient s'appliquer par son milieu contre le fil; c'est tout ce qu'il peut faire.

L'expérience du ruban métallique est simple, satisfaisante et frappante; mais les propriétés rotatoires inhérentes aux aimants peuvent être illustrées d'un grand nombre de manières différentes. Ainsi, montons entre pointes un disque

Fig. 20.



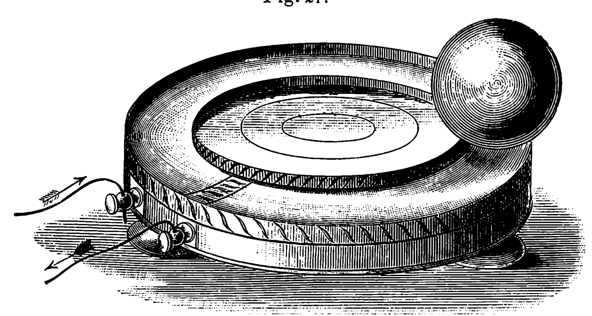
Disque réduit à deux de ses rayons faisant contact avec des godets à mercure et tournant sous l'influence de l'aimant A.

de métal, et disposons un contact frottant à la circonférence (balai ou mercure); puis envoyons un courant passant du centre à la circonférence et approchons un aimant disposé le long de l'axe, ou mieux, deux barreaux aimantés ayant leurs pôles opposés en regard de chaque côté du disque et voisins du contact mobile : le disque va se mettre en rotation (*fig.* 18 et 19).

Au lieu d'un disque, il suffit d'utiliser simplement l'un de ses rayons, c'est-à-dire un bras mobile (*fig.* 20) plongeant

dans une rigole circulaire pleine de mercure; nous pouvons aussi employer une sphère roulant sur deux rails circulaires

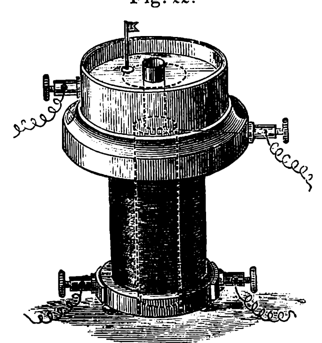
Fig. 21.



Voie circulaire de Gore; la sphère métallique servant à établir le contact entre les deux rails tourne sous l'action d'un champ magnétique vertical.

concentriques (dispositif de Gore, *fig.* 21). Dans chaque cas, la rotation commence dès que l'on approche l'aimant.

Fig. 22.



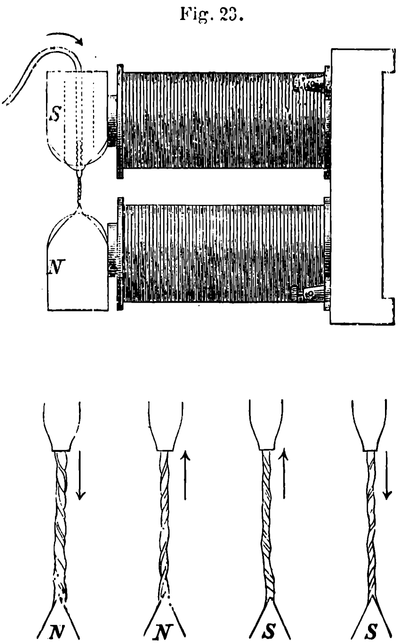
Rotation d'un liquide où circule radialement un courant électrique et placé dans un champ magnétique vertical.

72. Il faut bien remarquer que cette action rotatoire n'est nullement confinée aux conducteurs métalliques et à la conduction proprement dite. Les liquides et les gaz, bien qu'ils conduisent plutôt par convection, subissent exactement la même action.

Pour montrer un cas de rotation d'un liquide sous l'influence d'un aimant, prenons une auge circulaire remplie d'un électrolyte et munie de deux électrodes, l'une au centre et l'autre à la circonférence et disposons un pôle magnétique en dessous. Le liquide se met à tourner et, en employant un électro-aimant suffisamment fort, peut même tourbillonner assez vivement pour être projeté contre les bords (*fig.* 22).

L'expérience est identique à celle des *fig.* 19 et 20, si ce

Fig. 23.



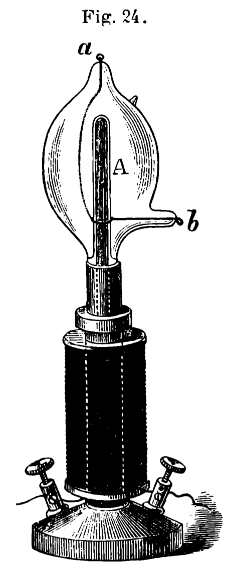
Veine liquide parcourue par un courant et tordue par l'action d'un champ magnétique (S. P. Thompson).

n'est qu'un disque fluide remplace le disque solide. En renversant les pôles de l'aimant, le sens de la rotation est également renversé.

Un autre dispositif d'expérience consiste à envoyer un courant dans un jet de mercure proche d'un aimant; ce jet se tord alors sur lui-même en spirale plate, comme le montre la *fig.* 23.

La rotation d'une décharge électrique à travers un gaz se réalise le plus facilement avec l'appareil indiqué *fig.* 24, où les extrémités d'une bobine d'induction aboutissent dans un gaz

Fig. 24.



Rotation de la décharge d'une bobine d'induction dans un gaz raréfié, sous l'influence d'un barreau aimanté.

raréfié, d'un côté en face d'un des pôles d'un barreau aimanté, et de l'autre au milieu de celui-ci. Lorsqu'on parvient à concentrer la décharge d'un côté, on voit tourner cette ligne brillante autour de l'aimant.

Action d'un pôle sur une charge électrique mobile.

73. D'après tous ces faits, on ne peut douter qu'une balle de sureau chargée, se mouvant dans le voisinage d'un aimant, ne soit soumise à la même action. On ne connaît aucune action entre un aimant fixe et un corps chargé stationnaire; mais, dès que l'un des deux commence à se mouvoir, il naît

une action réciproque qui tend à les faire tourner l'un autour de l'autre.

Il est vrai que pour les vitesses normales cette action est extrêmement faible; néanmoins, il est certain que si une balle de sureau ou de la poudre de lycopode chargée tombent en face d'un aimant, ils seront déviés de la verticale et se déplaceront suivant une trajectoire hélicoïdale. De même, si une série de particules chargées étaient projetées horizontalement et radialement à partir du pôle d'aimant, leurs trajectoires tourneraient; au contraire, si, d'une manière ou d'une autre, ces trajectoires étaient maintenues rectilignes ou déviées de toute autre façon, il en résulterait, comme réaction, un couple infiniment petit tendant à faire tourner l'aimant autour de son propre axe.

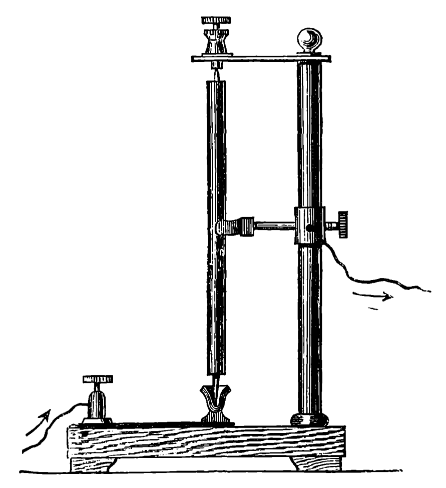
Inversement, si un aimant était maintenu mécaniquement en rotation rapide autour de son axe, il est presque certain qu'il agirait sur des corps chargés situés dans son voisinage, en tendant à les faire mouvoir radialement, vers lui. Néanmoins, ceci est une expérience qu'il serait désirable de faire, et le dispositif le plus simple serait de suspendre une sorte d'aiguille d'électromètre, électrisée positivement à une extrémité et négativement à l'autre, et d'observer s'il se produit en regard d'un aimant une rotation, une déviation réversible avec le sens de la rotation. Il serait, du reste, plus facile d'essayer l'action d'un aimant d'intensité variable ([1]).

Rotation d'un aimant par un courant.

74. La manière la plus simple de montrer une rotation réelle d'un aimant par un courant est de faire passer celui-ci

([1]) Le premier de ces phénomènes, l'action d'une charge mobile sur un aimant fixe, a été effectivement observé par Rowland, en faisant tourner un disque chargé en présence d'une aiguille aimantée; l'effet inverse doit certainement se produire, puisque cette action ne peut dépendre que des vitesses relatives. Quant à l'action d'un champ magnétique variable sur une charge statique, M. Lodge a essayé postérieurement de l'observer, mais les résultats de ses expériences ne paraissent pas très concluants, à cause de la petitesse des forces en jeu. (*Note du Traducteur.*)

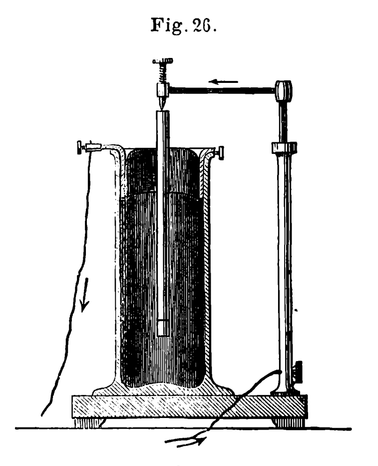
Fig. 25.



Rotation d'un cylindre aimanté parcouru par un courant passant de l'axe à la périphérie.

dans le sens de l'axe, à partir du milieu, avec retour par l'exté-

Fig. 26.

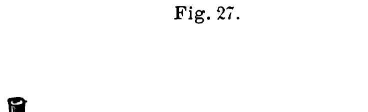


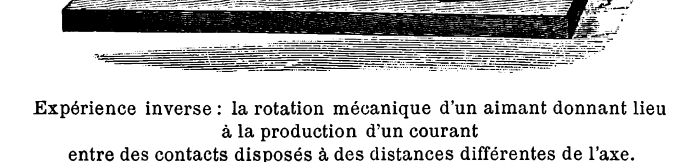
Autre dispositif de la même expérience.

rieur. Par exemple, prenons un barreau aimanté cylindrique,

bien poli, montons-le verticalement entre pointes, et faisons-y appuyer délicatement deux frotteurs en clinquant, l'un au milieu, l'autre à l'un des bouts; en envoyant un courant par ces deux balais, on verra l'aimant tourner avec rapidité. Si nous renversons le sens du courant, l'aimant se mettra à

Fig. 27.





Expérience inverse : la rotation mécanique d'un aimant donnant lieu à la production d'un courant entre des contacts disposés à des distances différentes de l'axe.

tourner en sens contraire. Inversement, si nous le faisons tourner mécaniquement, un courant va s'établir dans le circuit (*fig.* 25, 26 et 27).

75. Le dispositif employé par Faraday, et qui consiste en une rigole annulaire pleine de mercure dans laquelle plonge un fil relié à l'aimant, est moins simple et moins sensible.

On peut imaginer, du reste, bien d'autres modifications de cette expérience, mais celles-ci sont typiques et montrent qu'au point de vue électrique l'aimant implique quelque phénomène de rotation.

CHAPITRE VIII.

NATURE DU MAGNÉTISME.

Théorie d'Ampère.

76. L'idée que le Magnétisme pourrait bien n'être que le résultat de tourbillons électriques n'est pas une idée nouvelle, elle remonte à Ampère. Considérant qu'un aimant pouvait être remplacé par un solénoïde, il émit cette hypothèse qu'il existait dans chaque aimant un tourbillon électrique qui était la cause de ses propriétés. Il ne supposait pas, bien entendu, que dans un barreau aimanté il existe un courant qui circule tout autour, comme dans le cas d'un électro-aimant; rien n'est plus certain qu'un aimant ne forme pas un tout comme tel, mais que chaque particule constitue un petit aimant, ainsi que le prouve la vieille expérience qui consiste à casser un aimant en morceaux.

Chaque particule ou molécule du barreau doit avoir son courant électrique propre, et cela suffit pour expliquer les propriétés de l'ensemble.

Une seule difficulté se présente d'elle-même dans cette théorie : comment se maintiennent ces courants moléculaires ?

Une difficulté du même genre se présenta autrefois aux astronomes : qu'est-ce qui maintient le mouvement des planètes ? Pour parer à cette difficulté, on n'hésita pas à imaginer des esprits conducteurs, des tourbillons et divers autres

mécanismes. A la lumière de la Mécanique de Galilée, la difficulté s'évanouit : les corps continuent d'eux-mêmes à se mouvoir tant qu'ils ne sont pas arrêtés par une cause extérieure. Quand il n'y a pas de résistance, le mouvement est essentiellement perpétuel.

Qu'est-ce qui arrête un courant électrique ordinaire ? La résistance. Excitons un courant dans un circuit, d'une manière quelconque, et laissons-le à lui-même, il y dissipera bientôt son énergie en chaleur. Mais si le métal conduisait infiniment bien, il n'y aurait aucune dissipation d'énergie et le courant serait permanent.

Dans un fil métallique, le courant doit passer d'un atome à l'autre, et il rencontre une certaine résistance dans ce passage ; mais qui nous dit que les atomes eux-mêmes ne conduisent pas parfaitement bien ? Nous savons qu'ils possèdent déjà un certain nombre de propriétés parfaites : ils sont infiniment élastiques, par exemple. Plaçons un récipient plein de gaz dans de la ouate, et voyons s'il va se refroidir dans le cours des siècles ? Cette expérience serait désirable, mais en tout cas, jusqu'à présent, les faits connus nous permettent de supposer qu'il n'y a pas de pertes de mouvement parmi les atomes gazeux qui se choquent.

Les atomes étant infiniment élastiques, pourquoi ne seraient-ils pas infiniment conducteurs ? Comment un courant électrique circulant entièrement à l'intérieur d'un atome pourrait-il y dissiper de l'énergie ? Il n'y a aucune raison pour supposer qu'il en puisse être ainsi, et plusieurs analogies conduisent à la conclusion contraire.

D'où pourraient provenir ces courants ? Mais on peut aussi bien se demander d'où provient l'une quelconque des propriétés de la matière. Ces questions sont insolubles ; il nous suffit qu'il en soit ainsi. Les atomes d'une substance déterminée, le fer, par exemple, ou le zinc, possèdent des courants moléculaires dont l'intensité constitue une de leurs propriétés spécifiques.

Ce qu'il y a de bien certain, c'est qu'on ne peut exciter ces courants par une action magnétique. Lorsqu'on aimante un morceau de fer ou d'acier, on n'excite pas de courants d'Am-

père dans chaque molécule : celles-ci étaient déjà complètement aimantées avant de subir cette action. L'aimantation consiste bien plutôt à orienter les molécules d'une certaine manière, ou à les polariser. C'est du reste ce que prouve l'expérience déjà ancienne de Beetz.

Extension de la théorie d'Ampère. Hypothèse de Weber sur le diamagnétisme.

77. Résumons un peu ce qui est acquis comme conséquence de notre première hypothèse.

1° Un aimant consiste en un ensemble complexe de molécules polarisées.

2° Ces molécules constituent chacune un aimant permanent, que le corps soit à l'état neutre ou qu'il soit aimanté, l'aimantation consistant à les orienter plus ou moins suivant une certaine direction.

3° Lorsque toutes les molécules sont orientées dans la même direction, le corps est aimanté à saturation.

4° Chaque molécule possédant un courant déterminé circulant dans un conducteur de conductibilité infinie, on explique parfaitement les propriétés magnétiques ; mais comment se fait-il que ces courants ne puissent être engendrés par l'induction magnétique ? Et ne pouvant les faire naître, sommes-nous capables d'en faire varier l'intensité ?

78. Les propositions suivantes, que nous expliquerons et justifierons plus loin, répondent à toutes ces questions.

5° Lorsqu'un corps possédant ces courants moléculaires est soumis à l'action d'un champ magnétique, toutes les molécules qui peuvent être orientées dans le sens des lignes de force subissent une diminution de leur courant spécifique ; lorsque le champ cesse d'agir, ces courants reprennent leur intensité normale.

6° Si les courants normaux circulant dans les molécules sont faibles ou *nuls*, le fait de placer cette substance dans un champ magnétique amènera l'inversion de ces courants ou

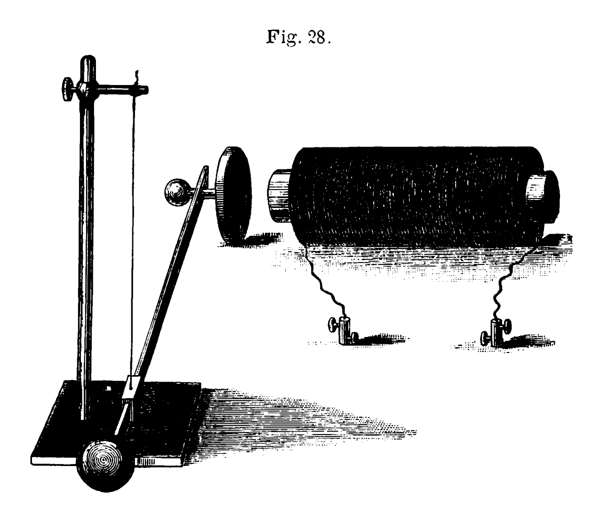
excitera des courants de sens *opposé* qui dureront aussi longtemps que l'action du champ et disparaîtront avec elle.

7° Le même fait se produirait, quelle que soit l'intensité des courants moléculaires, dans le cas où les molécules seraient fixes et incapables de s'orienter sous l'action du champ.

8° Les courants moléculaires ainsi induits magnétiquement suffisent pour expliquer le *diamagnétisme*.

79. Rappelons d'abord les lois bien connues de l'induction

Fig. 28.



Répulsion et attraction d'un disque de cuivre au moment de l'établissement ou de la destruction d'un champ magnétique transversal.

électromagnétique. Un circuit conducteur, tel qu'un anneau ou une bobine de fil, étant approché rapidement d'un aimant ou d'un circuit électrique, il y naît un courant d'induction momentané de sens opposé au courant inducteur, c'est-à-dire d'un sens tel qu'il y ait répulsion entre les deux. Tant que le circuit induit reste fixe, aucun phénomène ne se produit plus, mais dès qu'on l'éloigne de nouveau, il y a induction d'un autre courant momentané de sens contraire au premier. La manière la plus simple d'exprimer ce fait d'une manière tout à fait générale est de dire que, chaque fois que le nombre de lignes de force

qui traversent le conducteur vient à augmenter, un courant est induit, qui tend à chasser le conducteur hors du champ. Cette perturbation n'est que temporaire, mais dès que le champ varie de nouveau pour reprendre sa valeur primitive, un flux inverse correspondant précisément à la même quantité d'Électricité est induit. La *fig.* 28 montre comment on peut démontrer cette action. Un disque de cuivre est suspendu à l'extrémité d'un fil de torsion et amené à proximité d'un électro-aimant non excité. Dès qu'on excite celui-ci, le disque est projeté violemment, pour être attiré au contraire lorsque l'aimantation cesse.

80. Or pourquoi ces effets sont-ils momentanés? Pourquoi les courants induits cessent-ils de suite? Uniquement à cause de la dissipation d'énergie due à l'imparfaite conductibilité du circuit. Rien ne tendant à entretenir ces courants qui doivent surmonter une certaine résistance, ils cessent bientôt.

Mais dans un conducteur parfait, tel que les molécules, il n'y a aucune dissipation de ce genre. L'Électricité, dans un corps pareil, obéit à la première loi de Galilée, et continue à se mouvoir jusqu'à ce qu'elle soit arrêtée par une autre cause. La disparition du champ magnétique arrêtera le courant moléculaire et c'est la seule cause qui puisse l'arrêter.

Il en résulte que l'effet de répulsion que l'on observera ne sera plus transitoire, comme dans l'expérience de la *fig.* 28, mais durera autant que le champ magnétique qui y donne lieu. Par suite, un corps dont les molécules sont des conducteurs parfaits, mais sont dépourvues de courants propres, se comporte comme un corps diamagnétique, c'est-à-dire qu'il se mouvra des parties du champ où la force magnétique est intense vers les points où elle est faible et, par suite, se placera transversalement entre les pôles d'un électro-aimant, comme c'est le cas pour le bismuth.

Bien qu'on ne puisse affirmer que cette explication, qui est connue sous le nom de *Théorie de Weber*, corresponde à la réalité des faits, elle est au moins suffisante.

Il n'est pas absolument nécessaire que les courants moléculaires spécifiques soient *nuls* dans une substance diama-

gnétique, il suffit seulement que leur intensité soit moindre que celle qui serait produite par les champs magnétiques ordinairement employés. En expérimentant dans un champ extrêmement faible, les courants spécifiques pourraient ne pas être neutralisés et, dans ce cas, le corps pourrait se comporter comme une substance faiblement magnétique. On a réellement cherché s'il en était ainsi, mais sans succès jusqu'à présent.

81. Une objection qui se présente ici est la suivante : Supposons que les molécules soient maintenues de telle manière qu'elles ne puissent tourner, une substance semblable ne pourrait présenter aucune des propriétés magnétiques. Par exemple, si les molécules s'étaient disposées d'elles-mêmes, de manière à présenter le minimum d'énergie potentielle, une fois fixées dans cette position, rien ne pourrait les en faire sortir; mais les courants induits qui donnent lieu aux propriétés diamagnétiques ne s'en superposeraient pas moins aux courants initiaux, comme si ceux-ci n'existaient pas. En variant la température d'un corps pareil, on pourrait peut-être modifier cette disposition des molécules, et le corps présenterait alors des propriétés magnétiques, exactement comme la tourmaline devient électrique lorsqu'on l'échauffe ou qu'on la refroidit. Un tel phénomène n'a jamais été observé.

Nous sommes maintenant à même de mieux comprendre pourquoi les courants moléculaires nécessaires pour expliquer le Magnétisme ne peuvent pas être excités par la force magnétique qui produit l'aimantation, parce qu'ils agiraient dans ce cas en sens inverse de celui qu'on observe en réalité. Des courants moléculaires *induits* donneraient lieu à des répulsions; par suite, ceux qui donnent lieu aux attractions doivent préexister, et être seulement orientés par la force magnétisante.

Effet du fer dans un électro-aimant.

82. Nous pouvons également expliquer comment le fer ou toute autre substance magnétique peut agir pour augmenter

l'intensité des effets magnétiques. Considérons une bobine circulaire (*fig.* 29) et faisons-y passer un courant; il y aura un certain champ, un certain nombre de lignes de force qui passeront entre ses bouts. Si nous introduisons un noyau de fer, de manière à réaliser un électro-aimant en fer à cheval, l'intensité de ce champ augmente dans une très forte proportion. Pour l'expliquer, on assimile en général le circuit magnétique au circuit voltaïque; il y a une certaine force magnéto-motrice et une certaine résistance magnétique : leur quotient donne l'induction magnétique, ou le nombre total de lignes de force. Le fer est plus perméable que l'air, disons 3000 fois, et par suite la résistance de la partie du circuit qui est constituée par le noyau de fer est pour ainsi dire négligeable devant celle de l'espace compris entre les faces polaires ou de l'entrefer. Par suite, on obtient l'intensité du champ avec une approximation suffisante en divisant la force magnéto-motrice par la longueur d'entrefer, ou mieux encore, en traitant les diverses parties du circuit comme on le ferait dans le cas d'un conducteur de section et de conductibilité variables, pour obtenir sa résistance totale.

Fig. 29.

Solénoïde circulaire à noyau de fer.

Le fer doit être regardé ainsi comme un corps magnétique de 100 à 10 000 fois plus conducteur que l'air.

Sa conductibilité magnétique ou, comme l'a appelée Thomson,

sa perméabilité magnétique, est mesurée par le rapport du flux d'induction magnétique engendré à la force magnétique qui le produit; on le désigne généralement par le symbole μ.

83. Cette manière de se représenter les choses est simple et commode, mais ne donne pas l'explication vraie du phénomène. Si nous voulons nous représenter ce qui a lieu réellement, nous pouvons raisonner comme il suit. Avant que le fer fût introduit dans la bobine, il y avait à l'intérieur de celle-ci un certain nombre de lignes de force circulaires dues au courant seul. Un morceau de fer doux, quoique composé de molécules polarisées, ne présente aucun champ extérieur ou lignes de force utilisables : elles sont toutes à l'intérieur de la masse où elles forment des circuits fermés; mais, dès que le fer se trouve lui-même dans le champ magnétique, quelques-uns de ceux-ci s'ouvrent, une chaîne de molécules polarisées se forme, et les lignes dues aux courants moléculaires s'ajoutent à celles qui correspondent au courant de la bobine magnétisante.

Ainsi notre électro-aimant annulaire ne possède pas seulement ses propres lignes de force, mais un grand nombre de celles qui appartiennent au fer lui-même et qui se sont placées parallèlement aux premières.

Nous pouvons, en passant, faire la remarque suivante : le fer ajoute environ 3000 lignes de force (ou un nombre variable suivant sa qualité) pour chaque ligne propre du champ, tant qu'il conserve sa perméabilité maxima, ou qu'il est infiniment loin de la saturation; mais cet état ne dure pas : bientôt il montre des signes d'appauvrissement et finalement n'ajoute plus aucune ligne de force; il est alors complètement saturé; sa perméabilité est exactement égale à celle de l'air. Cette perméabilité du fer est une quantité entièrement indéterminée. Non seulement elle varie pour le même échantillon, à mesure qu'on s'approche de la saturation, mais elle diffère énormément pour les divers échantillons. Ainsi il existe certains aciers manganésifères dont la perméabilité n'est que 1,5 fois plus grande que celle de l'air, ou égale à peu près à celle du zinc, tandis qu'Ewing a trouvé pour certains fers une perméabilité maxima allant jusqu'à 20 000.

Le résultat final des deux modes de représentation est naturellement le même, c'est-à-dire que le flux magnétique entre les pôles est augmenté par la présence du fer; mais, tandis que dans la première explication le fait de la perméabilité doit être accepté comme tel, dans la seconde il n'y a d'inexpliqué que le fait fondamental que les courants tendent à se placer parallèlement (¹).

Magnétisme permanent.

84. L'introduction du fer ou de tout autre corps magnétique solide dans un champ magnétique donne lieu à un effet curieux, qui ne doit pas être omis. Cet effet dépend de la rigidité de la substance, c'est-à-dire de la fixité de ses molécules. Dans un fluide, les molécules sont libres de prendre facilement une position nouvelle : il n'y a pas plus de structure interne qu'il n'y a de forme extérieure définie. Mais, pour les solides, c'est différent : leurs molécules, une fois dans une certaine position, tendent plus ou moins à y rester.

Ces corps sont élastiques jusqu'à un certain point, mais, après un déplacement considérable, il y aura toujours une déformation permanente. C'est pourquoi les solides ont une forme définie qui ne peut être modifiée que par l'action de forces, et c'est pourquoi aussi ils peuvent cristalliser, leurs molécules se plaçant suivant certaines positions géométriques. Or, puisque le fait de l'*aimantation* consiste à orienter plus ou moins dans une direction des molécules polarisées, il s'en-

---

(¹) D'après cette théorie, l'effet du champ magnétique excitateur est double, il oriente les files de molécules, ce qui augmente le flux dans chaque section, mais en outre, il doit diminuer les courants intérieurs des molécules orientées. On doit donc s'attendre à ce que l'intensité d'aimantation finisse par diminuer lorsque la force magnétique augmente. On a cherché s'il en était réellement ainsi, et en particulier, MM. Ewing et Low ont trouvé qu'en poussant l'induction magnétique au delà de 40000 unités, l'intensité d'aimantation n'était plus que de 1400 unités, tandis que cette grandeur allait jusqu'à 1600 avec des champs moins intenses. On était dans ce cas bien près de la *saturation*, la perméabilité étant descendue à 1,7. Néanmoins, vu le dispositif d'expérience, on ne peut guère, croyons-nous, considérer le fait comme parfaitement établi. (*Note du Traducteur.*)

suit que des solides aimantés doivent se comporter différemment des fluides.

Dans des milieux fluides, l'arrangement magnétique ne peut être maintenu que par l'action continue de la force magnétique extérieure ; dès que celle-ci cesse d'agir, les molécules reprennent immédiatement leur ancienne position, qui correspond au minimum d'énergie, et toute trace d'aimantation disparaît. Ces milieux s'aimantent avec la plus grande facilité et se désaimantent d'eux-mêmes.

Mais, dans le cas des solides, il en est tout autrement. Les molécules, si elles ne sont orientées que par une faible force, reviendront presque complètement à leur ancienne position lorsque la force cessera d'agir ; par contre, si elles ont été orientées par une force intense, le retour ne sera que partiel et il y aura orientation résiduelle. L'orientation élastique constitue le Magnétisme temporaire ; la déviation résiduelle constitue le Magnétisme rémanent. Il y a donc une grande analogie avec les phénomènes d'élasticité.

Les divers corps diffèrent beaucoup dans leur propriété de retenir ainsi l'aimantation : comme on le sait, elle est développée au maximum dans l'acier trempé ; mais tous les corps la présentent plus ou moins.

De plus, le Magnétisme rémanent ne se produit en général que si le corps reste en repos ou ne subit aucune action ; il disparaît par le choc ou l'échauffement. Un long barreau de fer doux est très curieux à cet égard. Il peut être aisément aimanté par le champ terrestre lorsqu'on le choque en le tenant verticalement. Si maintenant on le retourne doucement, il gardera presque tout le Magnétisme induit ; mais si on le choque de nouveau (et il suffit quelquefois de le toucher du doigt), l'aimantation est immédiatement renversée.

Le fer doux peut, en fait, retenir une aimantation beaucoup plus forte que l'acier, mais il la retient avec peine.

85. Un barreau épais et court ne peut retenir qu'une aimantation beaucoup plus faible ; avec du fer très doux, c'est à peine si l'on peut constater des traces d'aimantation dans ce cas. Un morceau de fer de la forme de l'électro-aimant de la

fig. 29 aura plus de chance de conserver son aimantation, et si l'on ferme l'entrefer par une armature, il en retiendra une très forte proportion; un anneau parfaitement continu ne se désaimantera pour ainsi dire pas lorsqu'on interrompra le courant.

Néanmoins, même dans ce cas, il y a encore une certaine force démagnétisante et un anneau fluide ne conserverait aucune aimantation, aussi les chocs et les vibrations diminuent-ils beaucoup cette aimantation résiduelle; mais cette force démagnétisante est très faible, comparée à celle qui a lieu dans le cas où il y a un entrefer. Plus le chemin des lignes de force dans l'air est grand et plus facilement disparaît l'aimantation.

Les fluides n'exerçant aucune force pour retenir le Magnétisme, si des lignes de force sont produites dans l'air ou tout autre fluide par le voisinage d'un aimant, toute la tension qui résulte du maintien du Magnétisme, non seulement dans sa propre masse, mais dans tout le milieu environnant, c'est-à-dire la tension qui provient de la tendance de toutes les molécules à revenir à leur position primitive doit être supportée par le solide et met en jeu sa *viscosité*.

86. Tous les phénomènes du Magnétisme ont pris un nouvel intérêt depuis les recherches d'Ewing. Le fait connu depuis longtemps que les corps solides gardent dans leurs arrangements moléculaires des traces de toute disposition antérieure, en sorte qu'on peut observer des résidus d'un effet longtemps après que la cause de celui-ci a disparu, n'est nullement propre au Magnétisme : c'est une propriété générale des corps solides qui complique énormément toutes les lois qui s'y appliquent. Les propriétés de tous les fluides, que ce soient des gaz ou des liquides, ne dépendent que de leur état actuel, et nullement des effets qu'ils ont pu subir antérieurement ou de la manière dont ils sont arrivés à cet état actuel. De l'hydrogène à 0° C. et 76^{cm} de pression est un corps dont les propriétés sont absolument définies. De l'eau à 50° C. et une atmosphère de pression constitue également un corps défini ; il en est de même, au moins d'une manière très approchée, de certains solides cristallisés.

Une température et une pression données suffisent peut-être à caractériser du quartz ou de la glace; mais du verre, de l'acier ou du cuivre dans les mêmes conditions ne constituent nullement des substances définies. S'ils ont été amenés par refroidissement à cette température, leurs propriétés ne seront pas les mêmes que s'ils y sont arrivés par échauffement. Il faut encore savoir s'ils ont été trempés ou recuits, etc. *Les propriétés d'un corps solide dépendent de ses états antérieurs* autant que de son état actuel.

Ceci s'applique tout particulièrement au Magnétisme. Pour savoir quelles sont les propriétés d'un aimant, nous devons connaître non seulement son état actuel, mais la manière dont il y est arrivé. Un barreau d'acier, aimanté d'abord, puis désaimanté, n'est pas dans le même état que s'il n'avait jamais été soumis à une force magnétique, à moins qu'on ne l'échauffe fortement.

Il va sans dire que si nous connaissions *toutes* les particularités de l'état actuel, il serait inutile de nous reporter en arrière : on pourrait au contraire déduire une partie de son histoire de ses propriétés; mais c'est précisément parce que nous ignorons les positions et relations de toutes les molécules et n'avons qu'un ensemble restreint d'informations, qu'il est nécessaire de connaître les états antérieurs.

Il suffit de donner quelques conditions fondamentales dans le cas des fluides, mais cela n'est pas suffisant, en général, pour les solides et il convient de bien faire la distinction.

87. Une conséquence de ce fait est que, dans les solides, les effets directs et inverses d'un cycle ne sont généralement pas équivalents; deux causes inverses ne produiront pas des effets exactement opposés. Dans le cas d'un fluide, quelle que soit la série des opérations alternatives et inverses qu'il subit, il revient toujours à l'état initial, et ses propriétés ne seront pas affectées par un cycle fermé d'opérations. Mais dans le cas d'un solide, au contraire, il n'en est pas de même. Aimantons un barreau par une série d'opérations, et effectuons ensuite ces opérations dans l'ordre inverse, il ne reviendra pas à l'état primitif en repassant par les mêmes états intermédiaires; il ne

reviendra même pas du tout à l'état primitif. Si l'on continue à effectuer une série d'aimantations et de désaimantations, on pourra bien arriver à ramener au moins approximativement le corps à son premier état, mais ce ne sera pas par le même chemin ou par les mêmes états intermédiaires. Or, toutes les fois qu'un corps est amené d'un certain état A à un autre état B par un chemin, et ramené à l'état primitif par un autre, comme cela a lieu pour l'eau dans la machine à vapeur, le résultat est toujours un certain *travail* effectué ou fourni au corps dans le cycle d'opérations.

Dans le cas d'un fluide, on peut ou non revenir par le même chemin, et par suite mettre ou non du travail en jeu, mais avec un solide on n'a pas le choix, et cela est vrai en particulier pour l'aimantation. La courbe ascendante ou obtenue par une aimantation croissante ne coïncide pas avec la courbe descendante des aimantations décroissantes et l'on ne peut les faire coïncider. Par suite, toutes les fois qu'un morceau de fer est soumis à un *cycle d'aimantation*, il faut dépenser un certain travail.

Ce travail, en général, consiste dans la production d'une certaine quantité de chaleur; une pièce de fer aimantée et désaimantée rapidement s'échauffe. Cet effet d'échauffement *direct* est cependant très petit et généralement inappréciable en pratique. C'est à cette propriété du fer et des autres substances magnétiques qu'Ewing a appliqué le nom d'*hystérésis* ([1]).

Encore l'inertie électromagnétique.

88. Ici je dois m'arrêter pour attirer de nouveau l'attention sur ce point. Les théories du Magnétisme et du diamagné-

---

([1]) Cet effet est loin d'être négligeable, comme le pense l'auteur, et tous les ingénieurs savent qu'il faut en tenir compte dans l'établissement des machines dynamos et en particulier des appareils à courants alternatifs (transformateurs). Son rôle est au moins aussi important, dans ce cas, que l'échauffement produit par le passage du courant dans les conducteurs. (*Note du Traducteur.*)

tisme dont nous avons parlé, et telles que les ont établies Ampère, Weber et Maxwell, supposent, comme point de départ, que, dans un conducteur parfait, l'Électricité obéit à la première loi du mouvement, c'est-à-dire qu'elle continue à se mouvoir, jusqu'à ce qu'une force l'arrête.

Mais la propriété de la matière qui correspond à cette loi est l'*inertie ;* cette loi est la loi de l'inertie, et toute chose qui se comporte de même doit posséder de la masse.

Il serait imprudent de déduire une conséquence aussi fondamentale d'une simple hypothèse, mais il est bon au moins de faire remarquer qu'elle est impliquée dans la théorie d'Ampère. C'est la seule théorie que nous ayons sur le Magnétisme, et elle s'écroule dès que l'on n'attribue plus d'inertie à l'Électricité.

Néanmoins, on sait qu'un électro-aimant ne se comporte pas comme un volant ou une toupie : il ne présente aucune force vive proprement dite, qu'on puisse mettre en lumière par des phénomènes mécaniques. Si ce fait doit être considéré comme absolument exact, nous devons alors admettre qu'un courant électrique moléculaire consiste en deux flux opposés et égaux des deux Électricités, et l'on ne peut plus considérer l'Électricité négative comme le contraire, ou un déficit d'Électricité positive, comme le froid est l'inverse de la chaleur, mais il faut la considérer comme une entité propre.

89. Nous avons dit qu'aucun effet dû à l'inertie électrique n'était décelable *mécaniquement ;* ceci serait très naturel dans l'hypothèse que le courant électrique consiste en deux courants égaux et de sens opposés d'Électricité positive et négative. Représentons-nous un couple de tuyaux de caoutchouc liés ensemble, de manière à former un double tube, et faisons-y circuler de l'eau, en sens inverse dans chacun d'eux. Ce double courant n'a aucune des propriétés *gyrostatiques,* et la seule manière dont on pourra reconnaître la force vive de ce système sera la résistance rencontrée à faire varier la vitesse de l'eau, propriété analogue à celle des extra-courants en Électricité.

Tant que nous considérons le flux d'Électricité dans des

conducteurs ordinaires, nous pouvons éluder la question de l'inertie en supposant que le mouvement est produit en chaque point par la force suffisante pour vaincre la résistance locale ; mais bien que cette hypothèse explique parfaitement la forme des lignes de flux (*fig.* 15), elle ne suffit pas pour expliquer le phénomène de la self-induction, le retard du mouvement de l'Électricité à l'intérieur d'un fil jusqu'à ce qu'elle soit définitivement entraînée, et encore moins la persistance temporaire au mouvement après que la force a cessé d'agir. Mais maintenant que nous avons affaire à des *conducteurs parfaits*, dans lesquels il n'est pas besoin de l'action d'une force continue, la persistance des courants moléculaires sans inertie ou une propriété équivalente, qui y ressemble tellement qu'on pourrait lui donner le même nom, devient inexplicable.

A la vérité, les courants moléculaires ne sont encore qu'une hypothèse et c'est ce qui nous empêche de tirer ici une conclusion définitive à ce sujet.

CHAPITRE IX.

STRUCTURE DU CHAMP MAGNÉTIQUE.

---

90. Résumons rapidement les phénomènes et expériences variées qui nous ont conduit à une théorie dualistique de l'Électricité, une sorte de théorie des deux fluides, mais sous une forme modifiée.

En premier lieu, nous mentionnerons les anciennes expériences qui suggèrent vaguement l'existence propre de l'Électricité négative, ainsi :

1° Le *vent électrique* produit par une pointe, qu'elle soit positive ou négative et qui peut éteindre une bougie, que la pointe soit reliée au conducteur primaire et la bougie tenue à la main ou, au contraire, que la pointe soit tenue à la main et présentée à la bougie reliée à la source; de même aussi le tourniquet électrique, qui fonctionne soit comme induit, soit comme inducteur.

2° Certains phénomènes en relation avec l'étincelle électrique, comme dans les anciennes expériences de Wheatstone sur ce qu'il appelait la *vitesse de l'Électricité,* ainsi que le double bourrelet produit dans l'expérience du perce-carte, qui suggère l'idée que quelque chose a traversé à la fois dans les deux sens.

En outre, nous avons d'autres faits dont l'observation est plus récente :

3° Un diélectrique soumis à une tension électrique ne subit qu'une variation à peine appréciable de volume ; ce qui

indique de suite qu'on a affaire à une sorte de cisaillement ou de torsion, qui modifie la forme mais non le volume.

4° L'électrolyse et la double procession d'atomes se déplaçant en sens inverse.

5° Les phénomènes de self-induction et la manière dont se comporte un conducteur épais soumis à des courants alternatifs; le retard dans l'aimantation du fer, le fait du Magnétisme rémanent; enfin :

6° L'absence de force vive dans un courant électrique ou un électro-aimant, ainsi qu'on l'a constaté par tous les moyens mécaniques employés jusqu'ici.

Il va sans dire que la plupart de ces faits ne donnent que des indications superficielles qui demandent à être examinées de plus près. Il n'y a guère que les phénomènes rangés sous les chefs 3°, 4°, 5° et 6° qui fournissent réellement une indication précise sur ce point. En particulier, les faits 5° et 6°, considérés simultanément, constituent au moins une forte présomption en faveur de cette hypothèse dualistique à laquelle le fait 3° donne une nouvelle force.

Nous ne pouvons pas aller plus loin pour le moment et nous devons laisser la question à ce point.

Représentation d'un champ magnétique.

91. La perturbation qui constitue le Magnétisme et que nous avons reconnue provenir de quelque phénomène de rotation autour d'un axe n'est pas limitée au fer ou à l'acier des aimants : elle s'étend à tout l'espace environnant et constitue ce qu'on appelle le *champ magnétique*.

Une sorte de carte de ce champ nous est fournie par les fantômes magnétiques formés par la limaille de fer dont les particules se disposent à la suite les unes des autres, dans la direction de la force.

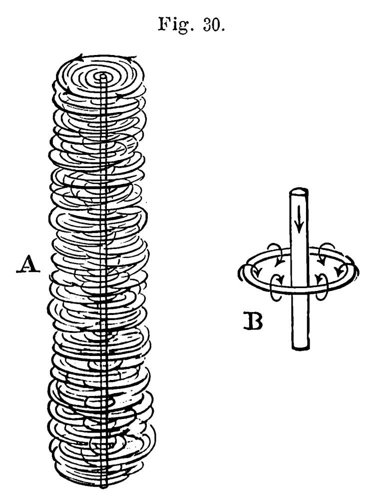
Les lignes de force ainsi représentées doivent être considérées comme les axes de tourbillons moléculaires. Elles ne sont que la continuation de lignes semblables dans la masse

du fer, et chaque ligne forme réellement une courbe fermée dont une partie s'étend dans l'air et l'autre dans le fer. Dans un solénoïde tel que ceux des *fig.* 16 et 29, ces lignes sont entièrement dans l'air, mais dans une partie de leur course elles traversent le solénoïde, et s'en échappent en passant en grande partie d'une de ses faces terminales à l'autre.

Mais, d'après la théorie des courants moléculaires d'Ampère, il n'y a aucune différence *essentielle* entre un solénoïde de ce genre et un aimant; dès que l'on considère les courants moléculaires, l'aimant se résout en une série de chaînes de courants moléculaires disposés le long d'une courbe fermée ou axe. Chaque atome, dans l'air comme dans le fer, est le siège d'un tourbillon électrique; ces tourbillons étant disposés de manière à avoir, en moyenne, leur plan normal aux lignes de force.

92. Représentons-nous maintenant une chaîne de petits

Fig. 30.



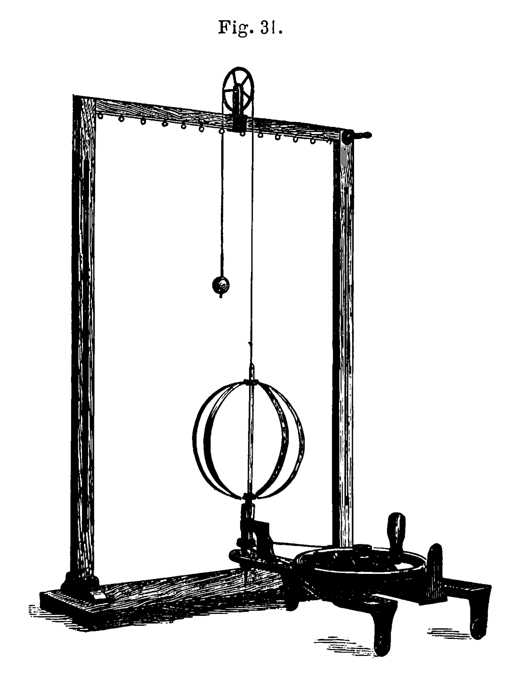
A, Élément d'une ligne de force magnétique entourée de son tourbillon électrique. B, élément de courant avec une de ses lignes de force et ses tourbillons électriques; chaque ligne semblable constitue un *vortex* électrique.

tourbillons (*fig.* 30), semblable à une série de perles enfilées

sur un cordon et tournant autour de lui, et voyons comment se comportera un fluide tournant ainsi.

Évidemment cette chaîne tend à tourner de plus en plus vite et à se raccourcir. Dans le cas d'un assemblage de tourbillons parallèles, ces chaînes vont donc se repousser latéralement en donnant lieu à une pression de tous côtés; en outre, elles

Fig. 31.



Modèle montrant l'action de la force centrifuge, et produisant une tension dans l'axe et une pression dans le sens normal.

tendent à rapprocher leurs extrémités libres en produisant une tension longitudinale.

De pareils tourbillons ne peuvent en réalité avoir d'extrémités libres, si ce n'est à la limite d'un milieu.

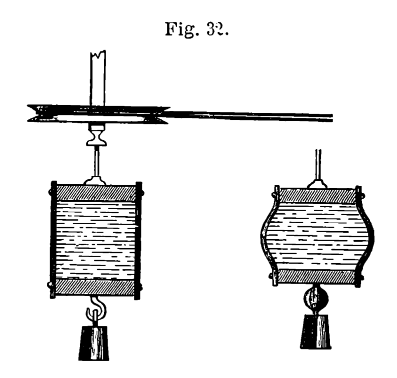
Les tourbillons magnétiques constituent toujours des courbes fermées, mais comme une partie peut se trouver dans un fluide mobile, tel que l'air, et l'autre partie dans un solide,

comme le fer, il convient de distinguer entre ces deux parties, et l'on peut se représenter la première partie de ces tourbillons comme s'étendant d'une pièce de fer à une autre, et par leur tendance à se raccourcir produisant leur attraction.

La disposition représentée *fig.* 31 montre l'action des forces développées dans un châssis élastique tournant autour d'un axe, soit dans le sens de cet axe, soit normalement.

On peut observer le même effet dans un tourbillon liquide

Fig. 32.



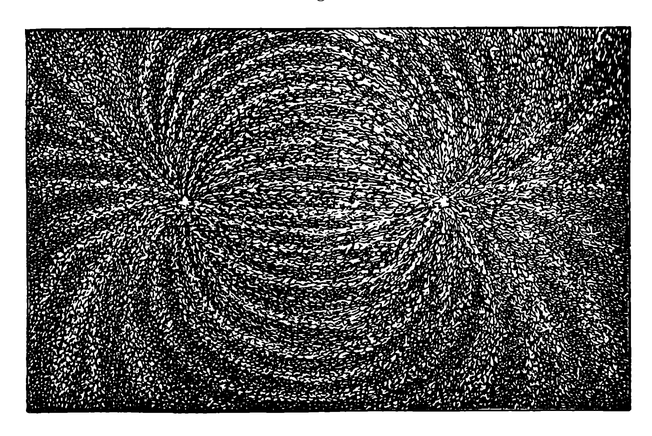
Cellule cylindrique à paroi élastique pleine de liquide donnant lieu à une tension axiale et à une pression équatoriale sous l'action de la force centrifuge.

produit dans un verre ; l'eau presse vivement contre les bords, s'y élève et déprime la surface libre. Encore mieux, on pourra réaliser l'expérience représentée par la *fig.* 32. Il est inutile naturellement que le vase lui-même tourne, l'effet est le même lorsque le liquide seul est en mouvement.

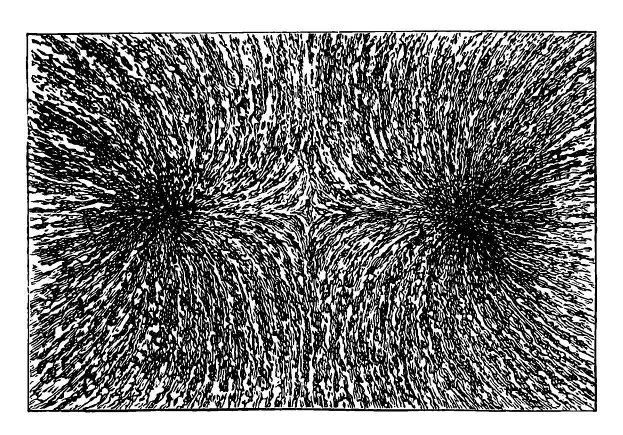
93. Imaginons maintenant un milieu composé d'une multitude de cellules pareilles, dans lesquelles le fluide est en mouvement de rotation, et supposons ou bien que chaque cellule est très longue, ou bien que les diverses cellules sont reliées bout à bout, de manière à former une série de chaînes parallèles, et nous aurons une représentation d'un champ magnétique et de ses lignes de force. Les extrémités des cellules ou du champ tendront l'une vers l'autre, ce qui correspond aux

attractions magnétiques, tandis que, d'autre part, les lignes

Fig. 33.



Attraction.



Répulsion.

Attraction et répulsion des lignes de force. La tension longitudinale des lignes de force produit l'attraction des pôles; leur répulsion latérale, la répulsion de ceux-ci.

de force ou chaînes de cellules s'écartent les unes des autres, comme si elles se repoussaient. Telle est la manière dont Clerk Maxwell se représentait le champ magnétique, ainsi

que la cause des tensions dans le milieu et des actions entre les corps magnétiques.

Chaque fois que des lignes de force passent d'un corps à un autre, ces corps sont tirés l'un vers l'autre, comme par l'effet d'autant de cordons élastiques tendus (*fig.* 33); au contraire, lorsque des lignes de force provenant d'un corps se présentent *latéralement* par rapport à celles qui proviennent d'un autre corps, ces deux corps se repoussent.

CHAPITRE X.

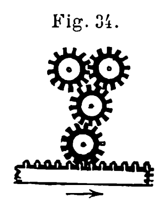
MODÈLES MÉCANIQUES DU CHAMP MAGNÉTIQUE.

Première représentation du champ d'un courant linéaire.

94. Reprenons maintenant le cas d'un simple circuit, ou mieux d'un conducteur linéaire et faisons-y naître un courant électrique. Comment pouvons-nous nous représenter la naissance des lignes de force ou le développement de l'induction électromagnétique ? Supposons d'abord que ce soit le courant qui excite le champ, au lieu de faire la supposition inverse qui pourrait bien être plus correcte en fin de compte.

Si nous pouvions nous représenter que l'Électricité propre

Fig. 34.



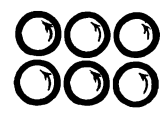
aux diverses molécules du milieu diélectrique aussi bien qu'à celles du conducteur soit liée, comme le serait une série de pignons engrenant les uns avec les autres et avec une sorte de crémaillère (*fig.* 34), on comprendrait que le courant, ou un déplacement longitudinal de cette dernière, amènerait une rotation se propageant latéralement. Mais, dans ce cas, les pignons

tourneraient les uns dans un sens, les autres dans le sens inverse, ce qui fausse l'analogie.

Comment est-il possible qu'une série de tourbillons parallèles tournent tous dans le même sens? S'il y a une liaison quelconque entre eux, ils s'arrêteront mutuellement, puisque les mouvements sont opposés aux points de contact, et, d'un autre côté, s'il n'y a pas de liaison, comment peut-on se représenter la transmission du mouvement tourbillonnaire dans le champ?

Pour cela, reprenons notre ancien modèle au moyen duquel

Fig. 35.



nous avons cherché à expliquer les phénomènes électrostatiques, et supposons qu'en outre de ses propriétés on ajoute encore un tourbillon magnétique caractérisé par le mouvement de rotation des perles enfilées sur nos fils (*fig.* 5, 6 et 7 *bis*), qui représentaient les deux Électricités toujours déplacées en sens inverse.

Si donc nous supposons que les pignons *fig.* 35 représentent alternativement des molécules chargées d'Électricité positive et négative, ils *doivent* réellement tourner en sens inverse et le déplacement électrique ou la rotation correspondant au champ magnétique a lieu dans une seule direction.

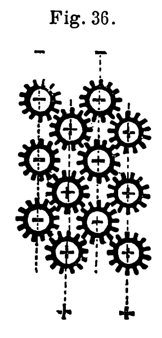
Chaque pignon engrène avec le suivant et le fait tourner, en sorte que le mouvement tourbillonnaire se partage de proche en proche dans le milieu, avec une vitesse qui dépend de l'élasticité et de la densité.

Il ne convient pas pour le moment de trancher la question de savoir si nos pignons représentent des atomes de matière ou seulement l'Électricité. Il se peut que chaque atome ait sa charge statique et tourne lui-même; dans ce cas, l'Électricité entraînée donne lieu au courant moléculaire.

L'inertie apparente de l'Électricité pourrait ainsi s'expliquer

d'une manière suffisamment simple par l'effet de l'inertie des atomes en mouvement de rotation, et l'absence de force vive dans un électro-aimant s'expliquer également par le fait de la

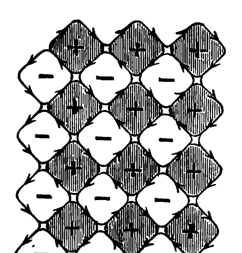
Fig. 36.



Séries de cellules alternativement positives et négatives, engrenant entre elles et mobiles autour d'axes fixes.

rotation en sens opposé des atomes adjacents. On peut se demander comment il se fait que les molécules opposées aient

Fig. 37.



Autre mode de représentation d'un champ magnétique.

une force vive exactement égale et opposée. Cette supposition est nécessaire, car autrement un milieu magnétique fluide tournerait comme un tout au moment où le champ serait excité ; il y a également d'autres difficultés relatives à ce mouvement des molécules chargées ; c'est donc une simple hypothèse, sur laquelle il convient de ne pas insister. Pour le

moment, il suffit parfaitement d'admettre l'existence de tourbillons de l'Électricité seule dans les atomes, ou même indépendamment de ceux-ci.

En effet, puisque l'induction magnétique a lieu également au travers du vide, il faut que notre système d'engrenage soit indépendant de l'existence d'atomes matériels. Si, d'un autre côté, on trouve que les espaces vides de la *fig.* 36 constituent une difficulté nouvelle, il suffit de modifier le mécanisme comme l'indique la *fig.* 37.

Représentation du courant électrique.

95. Il faut remarquer que, dans le milieu constitué comme nous venons de le dire et soumis à une force magnétisante, c'est-à-dire dans lequel tous les pignons tournent, il n'y a rien que l'on puisse assimiler à un courant électrique dans une direction quelconque. En effet, à chaque point de contact de deux pignons, les Électricités positive et négative se déplacent dans la même direction avec la même vitesse, ce qui ne constitue pas un courant. Il n'y a déplacement d'Électricité ou courant que dans le cas où les deux Électricités se déplacent en sens inverse, ou que l'une est en repos, ou encore qu'il y a une différence de vitesse entre elles.

Il est néanmoins facile d'obtenir avec ce modèle une représentation du courant électrique ; il suffit que l'entraînement des roues ne soit pas parfait et que la transmission du mouvement se fasse avec glissements. En chaque point où se produit un glissement, l'Électricité positive se déplace plus vite que la négative, ou *vice versa*, ce qui caractérise un courant.

Une ligne de glissement tracée au travers des divers pignons correspond ainsi à un courant linéaire et, si l'on y réfléchit, on voit de suite qu'une semblable ligne de glissement doit avoir un contour fermé. Car, si une roue seulement glisse, le circuit est limité à sa circonférence ; si une rangée tout entière glisse, le courant direct et celui de retour sont situés sur les deux bords de cette rangée. Mais on peut avoir une aire d'une

forme quelconque dans laquelle l'entraînement est parfait, limitée par une ligne suivant laquelle il y a glissement partiel; c'est alors un circuit de forme quelconque, mais toujours fermé.

Remarquons qu'il ne s'agit pas ici de représenter le courant par le déplacement des roues elles-mêmes : leurs axes sont toujours immobiles; ce que nous considérons, ce sont les déplacements relatifs d'une jante sur l'autre.

Par exemple, supposons que tous les pignons du groupe

Fig. 38.

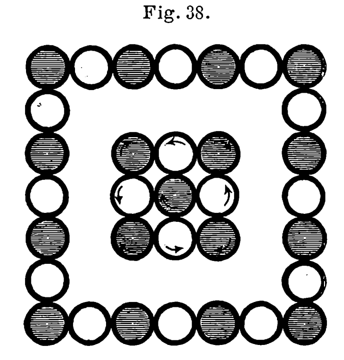


Diagramme d'un courant superficiel produit à la limite d'un conducteur parfait qui empêche toute transmission de mouvement au milieu extérieur et, par suite, agit comme un écran magnétique parfait.

intérieur de la *fig.* 38 tournent, les positifs dans le sens de l'aiguille d'une montre, les négatifs en sens inverse, et supposons en outre que les pignons qui sont à l'extérieur ou bien soient en repos, ou bien tournent en sens inverse. Dans ce cas, la limite du groupe intérieur est une ligne de glissement, le long de laquelle tous les pignons positifs se déplacent dans le sens des aiguilles d'une montre, et les négatifs en sens inverse; elle nous représente donc un courant positif dont le sens est celui du premier de ces mouvements.

Mais si cette rotation à l'intérieur continue, il est évident que tôt ou tard elle se communiquera aux pignons extérieurs, jusqu'à ce que, les vitesses étant égales, le glissement cesse. Il en sera réellement ainsi, à moins qu'il n'y ait discontinuité

complète de liaison, comme il est indiqué *fig.* 38. Mais, dans le cas contraire, le glissement à la limite ne peut être que temporaire; il ne dure que pendant les périodes d'accélération.

Distinction entre un diélectrique et un métal au point de vue de l'action d'un champ magnétique variable.

96. Dans un diélectrique, la liaison entre les atomes est définie et parfaite. Si l'un tourne, le suivant doit tourner; il n'y a pas de glissement possible, comme c'est le cas des engrenages proprement dits. Un courant de conduction est impossible. Au contraire, dans un conducteur métallique, l'engrènement est imparfait comme dans le cas des roues de friction, l'entraînement d'une roue par l'autre n'a lieu que graduellement et n'est jamais instantané; lorsque la vitesse varie, il y a toujours en un point d'une jante positive un mouvement qui n'est pas compensé complètement par un mouvement égal d'une jante négative. En d'autres termes, il y a un courant électrique momentané qui dure tant que les pignons n'ont pas pris leur vitesse finale.

Dans un conducteur *parfait*, il n'y a pas d'engrènement du tout; les atomes sont entièrement indépendants les uns des autres, et par suite le mouvement tourbillonnaire ne peut être transmis dans ou à travers un pareil milieu. Le seul courant possible dans un conducteur parfait ne peut avoir lieu qu'à la surface.

Tout milieu magnétisé doit donc, dans ce mode de représentation, être considéré comme formé d'une infinité de pignons en rotation, les positifs tournant dans un sens et les négatifs dans l'autre. Si le milieu est dans l'état naturel, mais qu'il soit magnétique, c'est-à-dire susceptible d'être aimanté, on peut se représenter ou bien que ses particules sont au repos, ou bien que celles-ci sont orientées dans toutes les directions; cette dernière représentation est probablement la plus exacte, bien que la première soit plus facile à comprendre au premier abord.

Que le milieu soit conducteur ou non, les roues seront toujours en mouvement dès que les lignes de force magnétiques y pénètrent, mais les roues d'un conducteur engrènent imparfaitement, et par suite, dans l'état variable du champ, lorsque la rotation augmente ou diminue, il y a une distinction importante à faire entre les milieux isolants et les conducteurs : durant la période d'accélération, un conducteur présente partout dans sa masse des glissements, et il faut un certain temps avant que l'état de régime soit atteint. Un certain temps peut aussi être nécessaire pour la propagation du mouvement dans le diélectrique, mais il est extraordinairement court, et il n'y a pas de glissements, mais une torsion élastique.

97. En ce qui concerne les corps fortement magnétiques, comme le fer, le nickel et le cobalt, il faut supposer qu'ils sont constitués de la même manière, mais avec des roues bien plus massives ou plus nombreuses. La quantité que nous avons appelée *perméabilité* équivaut ici à la densité du milieu magnétique.

Phénomènes relatifs à l'état variable du courant. Nature de la self-induction.

98. Essayons maintenant de nous représenter ce qui se passe dans le voisinage d'un conducteur dans lequel naît un courant.

Sans chercher à réaliser un modèle parfait du phénomène, nous pouvons imaginer quelque dispositif mécanique dont les propriétés présenteront une certaine analogie avec les phénomènes électriques, sans pour cela prétendre qu'elles les imitent exactement.

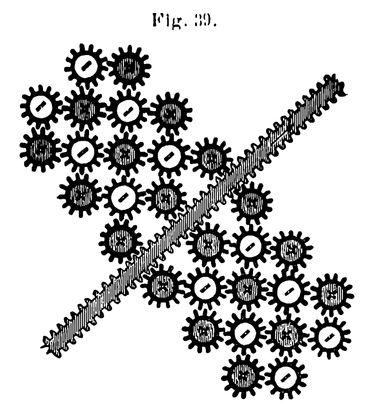
Considérons d'abord un système de roues d'engrenage, en prise les unes avec les autres et mues par une crémaillère (*fig.* 39). Nous nous attachons plus spécialement à la moitié de ces roues, alternées de deux en deux et qui repré-

sentent l'Électricité positive. Les roues intermédiaires sont nécessaires pour la transmission du mouvement et servent aussi à neutraliser tout déplacement réel d'Électricité dans une direction, excepté quand il y a glissement.

Nous supposons que chaque roue est inerte, c'est-à-dire qu'elle a une masse comme un volant.

Dès que notre crémaillère se met en mouvement, les roues

Fig. 39.



Représentation d'un courant électrique produisant son champ magnétique, ou étant, au contraire, engendré par celui-ci.

commencent à tourner et, rapidement, elles prennent la vitesse correspondante. Jusque-là, le mouvement de la crémaillère rencontre une résistance due, non au frottement ou toute autre réaction, mais à l'inertie du système.

Cette inertie correspond à ce qu'on appelle la *self-induction*, et son effet est celui de l'*extra-courant de fermeture*, ou mieux une force contre-électromotrice due à l'inertie électromagnétique ou à la self-induction.

Tant que la crémaillère se meut uniformément, le système d'engrenage n'exerce plus aucun effet, mais dès qu'elle s'arrête, elle ne peut le faire instantanément sans un choc violent : son mouvement est prolongé un moment par l'inertie du système. Nous avons ce qu'on appelle en Électricité l'*extra-courant de rupture*.

99. Si nous supposions, pour le moment, que la crémaillère corresponde au déplacement d'Électricité dans un conducteur métallique, notre figure représenterait la section du champ par un plan; pour reconstituer le système entier, il suffit de faire tourner le tout autour de la crémaillère. Dans ce cas, l'axe de chaque roue se transforme en un cercle et chaque roue en un anneau circulaire, ayant le mouvement d'un *vortex*, et tournant sur lui-même à mesure que la crémaillère avance, un peu comme une bague de caoutchouc roule sur elle-même quand on y force une tige en la maintenant en place (voir *fig.* 30, B).

A mesure qu'on s'éloigne de la crémaillère, la longueur des axes circulaires augmente, et comme la rotation totale est la même, il n'est pas difficile de comprendre qu'à mesure que la distance augmente, la vitesse de rotation diminue, en sorte qu'à une distance suffisante du conducteur l'état du milieu est à peine troublé ([1]).

100. Pour se rendre compte de la grandeur de la perturbation totale produite par un circuit donné, il faut considérer la forme de celui-ci, c'est-à-dire la position du courant de retour. Prenons d'abord une longue boucle étroite, le courant d'aller passant d'un côté, et le courant de retour, de sens opposé, de l'autre. Les rotations correspondant à chacun d'eux se superposent; elles s'ajoutent pour l'étroit espace compris entre les

---

([1]) Cette représentation est peut-être un peu plus difficile que l'Auteur ne veut bien le dire, car il est à peine besoin de faire remarquer que le nouveau système engendré par la rotation du premier autour de la crémaillère comme axe est absolument rigide et ne peut subir ni transmettre aucun mouvement. Pour que le mouvement soit possible, il faut que les engrenages en question, tout en engrenant les uns avec les autres, soient constitués par des particules pouvant prendre des vitesses variables les unes par rapport aux autres. Le milieu étant *incompressible*, la condition de *continuité* exige alors que les particules situées à l'extérieur des vortex aient une vitesse plus faible que celle des particules intérieures, et c'est pour cela que le mouvement va en diminuant d'intensité à mesure qu'on s'éloigne de l'axe de la perturbation. L'anneau de caoutchouc roulant sur une tige cylindrique présente quelque chose d'analogue, bien que la compressibilité de la matière fausse un peu l'analogie.

(*Note du Traducteur.*)

deux, mais sont de sens opposé pour l'extérieur, en sorte que le milieu extérieur ne subit qu'une action différentielle; il n'y a qu'un très faible volume de diélectrique soumis à une action intense, et par suite l'inertie ou la self-induction est très faible. (voir *fig.* 40).

Au contraire, si la boucle s'étend de manière à embrasser une aire considérable, comme la force centrifuge des roues

Fig. 40.

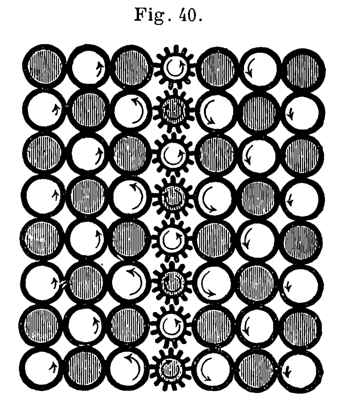


Diagramme du courant direct et du courant de retour, montrant la distribution des rotations et du glissement dans l'épaisseur des conducteurs et le diélectrique intermédiaire. Le diélectrique extérieur ne subit qu'une faible perturbation.
Dans le cas de deux courants de même sens, voir *fig.* 44.

tend à l'y contraindre, il y a alors une quantité de mouvement de rotation considérable, une grande force vive, et la self-induction augmente. L'axe de chaque anneau denté étant continu, cependant, doit se prolonger au dehors de la boucle, en sorte que la région extérieure est également affectée, mais là, le mouvement a lieu en sens inverse ([1]).

101. Les *fig.* 38 et 41 montrent quel est l'état du milieu

([1]) Il est également difficile de voir comment l'auteur fait intervenir ici la force centrifuge des vortex. Tout ce qu'on peut dire, c'est que, plus le circuit est étendu, et moins il doit y avoir de différences de vitesses entre les parties des tores situées à l'intérieur et celles qui sont à l'extérieur de ce circuit. (*Note du Traducteur.*)

dans le cas d'un circuit fermé. L'espace libre dans la *fig.* 38 représente un conducteur parfait ou une discontinuité absolue de liaison. D'un côté de cet espace, l'Électricité positive s'écoule dans la direction indiquée par les flèches; elle peut

Fig. 41.

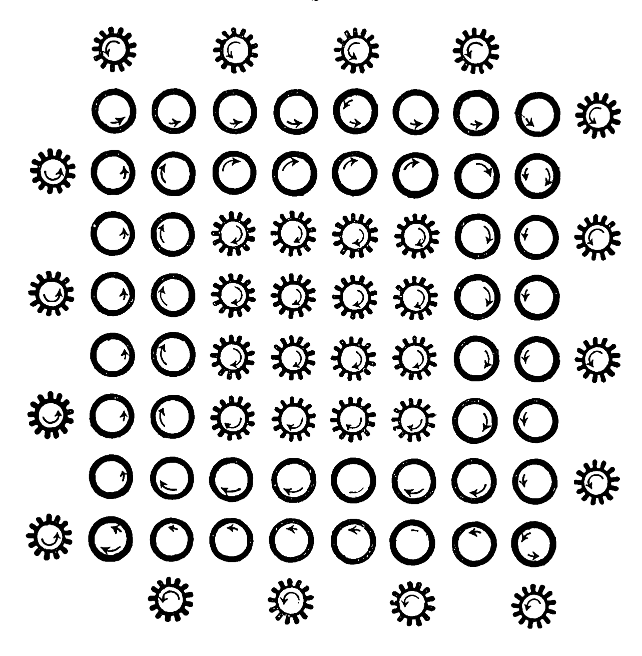


Diagramme d'un conducteur annulaire parcouru par un courant. (Les roues intermédiaires nécessaires à la transmission du mouvement positif ont été omises).

On a indiqué autant de roues à l'intérieur qu'à l'extérieur, pour rappeler le fait que les rotations totales sont égales, bien qu'à l'extérieur la rotation soit moins intense en chaque point, parce qu'elle est distribuée sur une plus grande partie de l'espace.

être également en mouvement de l'autre côté, mais à l'intérieur même du conducteur aucun phénomène n'a lieu.

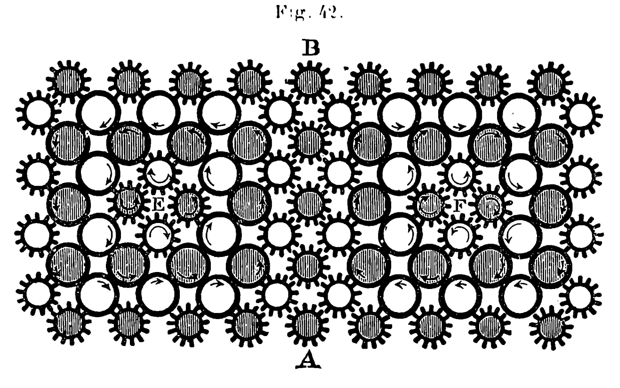
Dans le cas de la *fig.* 41, on a supposé, au contraire, avoir affaire à un conducteur ordinaire, et l'on a représenté celui-ci par des roues susceptibles d'un engrènement imparfait. Dans ce cas, un glissement est absolument nécessaire, puisque la rotation a lieu en sens inverse des deux côtés du conducteur,

en sorte que les atomes de ceux-ci doivent prendre un certain mouvement intermédiaire, les uns tournant dans un sens, les autres dans l'autre, ceux qui sont disposés le long d'une certaine ligne neutre restant stationnaires.

Si le conducteur est rectiligne et indéfini, cette ligne neutre est au centre; s'il forme une boucle, cette ligne est plus près de l'intérieur, parce que la rotation y est plus prononcée. Si la boucle est complètement aplatie, la ligne neutre est constituée par la limite extérieure (*fig.* 40). Si le conducteur est enroulé tout autour d'un tore ou anneau, les axes des tourbillons sont entièrement limités à l'intérieur de l'anneau et il n'y a aucune rotation à l'extérieur.

La *fig.* 42 représente la section du système dans ce dernier

Fig. 42.



Section d'un circuit magnétique fermé, produit par un solénoïde en forme d'anneau, d'axe A B.

Les flèches indiquent l'intensité de la rotation, soit celle du champ magnétique qui est maximum dans la ligne médiane et nulle à l'extérieur.

cas; les roues extérieures sont au repos, tandis qu'à l'intérieur elles tournent violemment, en sorte qu'il y a beaucoup de glissement entre les couches intérieures et extérieures du conducteur et par suite une forte dissipation d'énergie.

102. Ce phénomène de glissement dont nous venons de parler se produit dans tous les conducteurs transmettant un courant, que celui-ci soit constant ou variable, et il constitue en fait le courant.

Ce frottement est nécessairement accompagné d'une disparition d'énergie et d'une production de chaleur : ce n'est que dans un conducteur parfait qu'un courant peut être maintenu sans dépense d'énergie.

Dans le cas d'un courant constant, les glissements sont uniformément distribués dans toute la section du conducteur; dans l'état variable, cette distribution est inégale, les courants sont concentrés à la périphérie des conducteurs.

Quand un courant s'établit dans un fil, les couches extérieures se mettent les premières en mouvement, et ce mouvement ne pénètre que graduellement, bien qu'avec une vitesse extrême, dans les couches voisines de l'axe. Par suite, il en résulte que la self-induction d'un fil est d'autant plus grande qu'il est plus épais, et aussi qu'il est meilleur conducteur. S'il est en fer, le nombre de nos roues ou leur masse est beaucoup plus grand, en sorte que cette inertie est fortement augmentée.

Remarquons ici qu'il ne faut pas confondre le mouvement de rotation de nos molécules avec le glissement. Celui-ci constitue le courant, tandis que le premier est la cause des phénomènes électromagnétiques.

Il n'y a aucune rotation dans l'axe d'un fil infini parcouru par un courant, mais la rotation augmente en sens inverse, à mesure qu'on s'éloigne de l'axe, dans un sens ou dans l'autre, en donnant lieu à des *vortex* circulaires disposés autour de cet axe.

Le glissement, au contraire, est distribué uniformément dans le fil dès que le courant a atteint l'état de régime ; il a lieu uniquement dans la direction du fil, tandis que les axes de rotation sont à angle droit sur cette direction.

CHAPITRE XI.

MODÈLE MÉCANIQUE DE L'INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE.

Induction d'un courant dans un circuit secondaire.

103. Pour étudier la manière dont le champ magnétique

Fig. 43.

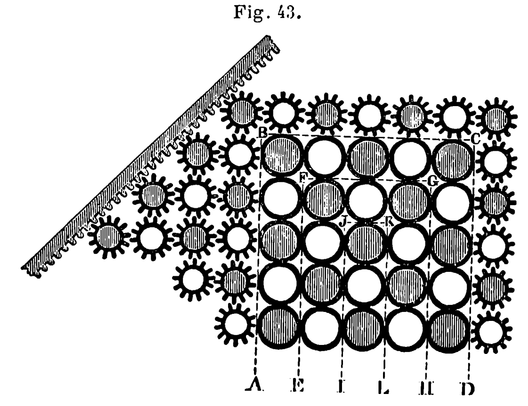


Diagramme montrant comment a lieu l'induction dans un conducteur placé dans un champ magnétique croissant ou décroissant.
Les lignes AB, CD, EF, GH sont des lignes de glissement successives.

excité d'une façon quelconque s'étend et se propage au travers d'un milieu conducteur, considérons la *fig.* 43, dans laquelle la région ABCD est formée d'un conducteur ordinaire, c'est-à-dire d'un milieu constitué par des molécules à engrènement imparfait.

Dès que notre crémaillère commence à se mouvoir, toutes les roues extérieures à ABCD se mettent en mouvement et arrivent rapidement à leur vitesse finale. Les molécules de la couche limite à l'intérieur de ABCD commencent également à tourner, mais non instantanément ; il faut un certain temps pour que le mouvement se communique.

Pour la couche suivante, le retard est encore plus grand et ainsi de suite. En fin de compte, le mouvement pénètre partout et le régime s'établit dans tout l'espace.

Mais, tandis que la vitesse de rotation croît, des glissements doivent se produire tout autour du circuit ABCD, et autour de tout circuit concentrique ; les roues positives de la périphérie qui se meuvent en sens inverse de celles qui sont en contact avec la crémaillère nous rappellent le courant inverse induit à la *fermeture* d'un circuit dans un conducteur voisin ; c'est ce qui arrive en général avec un champ magnétique croissant.

La pénétration lente du mouvement et la disparition graduelle de tous les glissements nous rappellent en outre la manière dont le courant induit se produit et disparaît peu à peu pour s'annuler quand le champ magnétique a pris partout sa valeur finale.

Si maintenant nous supposons que la crémaillère s'arrête, toutes les roues dentées s'arrêtent également, ce qui peut amener un choc et une disruption, ou bien produire une oscillation due à leur force vive et à leur inertie. Mais, à l'intérieur de ABCD, les molécules continuent à se mouvoir pendant quelque temps. Les couches extérieures glissent alors dans un sens qui correspond au courant direct produit à la *rupture* et sont les premières arrêtées ; cet effet se propage graduellement à l'intérieur, comme dans le phénomène primitif, jusqu'à ce que tout mouvement cesse. Ces glissements constituent le courant induit de rupture.

104. A travers un conducteur parfait, aucune de ces perturbations ne pourrait se propager, car les glissements à la couche extérieure seraient absolus et le mouvement ne serait pas communiqué. Un courant superficiel durant indéfiniment, ou mieux tant que le champ magnétique existerait, serait le

seul phénomène produit et le conducteur formerait *écran magnétique* parfait pour tout l'espace diélectrique situé derrière lui ou dans son intérieur.

105. Nous concevons maintenant qu'un *volant* en rotation constitue l'équivalent mécanique du Magnétisme ou mieux d'une section d'une ligne ou tube de force magnétique, tandis qu'un *frein* appliqué à l'un de ces volants et le glissement qui en résulte avec production de chaleur est en quelque sorte l'équivalent mécanique du courant.

Le champ doit être considéré comme rempli de *vortices* élastiques ou tourbillons liés entre eux, les uns à la manière d'engrenages rigides, les autres comme des roues de friction. Celles-ci permettent seuls les glissements et c'est dans l'espace correspondant que peuvent se produire les courants, l'énergie qui se dissipe dans ces parties y étant transmise depuis la source par l'intermédiaire du diélectrique, exactement comme l'énergie d'un moteur est transmise par des engrenages aux récepteurs où elle est dissipée par les frottements.

Transport de l'énergie à distance.

106. Essayons maintenant de nous rendre compte du rôle d'un fil télégraphique en nous plaçant à ce point de vue. Étant donné le moyen d'exciter le champ magnétique en un point, comment peut-on le transmettre en un autre endroit, de manière à y mouvoir une aiguille aimantée ou y produire tout autre signal? La première idée qui se présente est que, puisqu'il n'y a pas d'écran magnétique parfait, le champ de n'importe quel aimant est indéfini en étendue et par suite s'étend en n'importe quel endroit. Si nous avions en un lieu un fort barreau de fer pouvant être aimanté et désaimanté à volonté et dans un autre quelque magnétomètre sensible, le problème serait résolu. Il n'y a pas de raison pour que ce système de télégraphie sans fil ne puisse réussir à de faibles distances, mais le mal est que l'action d'un aimant varie en raison inverse

du cube des distances, en sorte qu'à quelques kilomètres le champ d'un aimant, même long de plusieurs mètres, est singulièrement faible.

Une idée connexe serait de conduire une partie des lignes de force au poste éloigné au moyen de tiges ou de fils de fer ; en formant une boucle reliant les deux stations et en disposant à l'une une hélice magnétisante, on pourrait observer à l'autre des courants induits. On constituerait ainsi un télégraphe particulier dans lequel un tourbillon magnétique seul serait transmis dans le fil et exciterait des courants induits.

Mais le circuit magnétique et le circuit électrique sont réciproques, et l'on pourrait penser qu'au lieu d'un long circuit magnétique avec de petits solénoïdes électriques aux extrémités, il serait préférable d'avoir un long circuit électrique avec de petits circuits magnétiques aux deux bouts, et c'est précisément ce qui est réalisé dans le télégraphe électrique.

Ce système est préférable pour le motif suivant. Le fer conduit les lignes de force quelques milliers de fois mieux que l'air, mais non pas infiniment mieux, en sorte que le long d'une immense boucle de fer un grand nombre de lignes de force se perdraient en se frayant un passage plus court dans l'air. Au contraire, le fil de cuivre conduit l'Électricité infiniment mieux que la gutta-percha ou la porcelaine et c'est ce qui fait la supériorité du télégraphe électrique.

Le plomb ou le maillechort conduisent un million de fois mieux que l'eau acidulée, et néanmoins il serait bien peu satisfaisant de produire les signaux électriques par un fil non isolé, immergé dans un vase d'eau acidulée. Or la perte dans le cas du circuit magnétique correspondant serait encore bien plus grande.

107. Mais quel est en réalité le rôle du fil télégraphique? Un champ magnétique induit à l'un des deux bouts excite un champ magnétique à l'autre bout avec une très faible perte; il est presque entièrement concentré à l'autre bout par le fil. D'une manière ou d'une autre, le fil nous permet de transmettre cet effet magnétique dans la direction voulue et de le reproduire à l'endroit voulu.

Il est d'usage de parler d'un courant traversant le fil, mais, maintenant que nous considérons le courant comme produit par le simple glissement des engrenages du milieu magnétique, nous voyons qu'en réalité rien ne passe le long du fil. Supposons le fil parfaitement conducteur : l'engrenage magnétique, qui pénètre partout et communique le tourbillon magnétique, cesse à sa surface et rien ne peut y pénétrer. Le fil, en fait, n'est rien autre, au point de vue électrique, qu'une ligne de glissement d'une forme quelconque pénétrant dans le champ et le modifiant.

Ceci étant, comment donc le fil peut-il nous servir à propager les signaux ? C'est ce qu'il nous reste à voir. Reportons-nous à la *fig.* 30, B et considérons-la à la lumière de la *fig.* 39 qui nous représente une section seulement, en sorte que les petites flèches de la *fig.* 30, B correspondent aux pignons de l'autre. De plus, imaginons que la crémaillère soit remplacée par une tige non dentée et faisons tourner les roues, comme les ferait tourner cette crémaillère ; alors, à la surface de la tige stationnaire, nous avons l'état de glissement qui constitue maintenant pour nous le courant. Quelle est la fonction de cette tige ? Elle permet la rotation en sens inverse de nos roues situées de côtés opposés, tandis que si celles-ci pouvaient engrener au travers, le mouvement ne pourrait avoir lieu.

Enlevons notre tige, et le seul champ magnétique que nous puissions réaliser est le tourbillon ordinaire autour des lignes de force, décroissant rapidement avec la distance; mais, dès qu'elle est introduite, nous avons un nouvel état de chose. Loin du fil, le champ est faible, mais il est intense tout autour, et cet état a lieu tout le long du fil, quelle que soit la distance.

Pour qu'un fil agisse de cette manière, il doit former un circuit fermé, et il doit y avoir quelque organe moteur en un point quelconque, afin d'exciter les *vortex* magnétiques. Ces conditions étant remplies, rien ne peut empêcher ces *vortex* de se propager le long du fil, quelque long qu'il soit et de produire leur effet à l'autre bout. Il n'est pas facile de figurer un diagramme de cette disposition, à cause du grand nombre de roues, et parce que celles-ci ne rendent pas bien compte de

la diminution du mouvement tourbillonnaire avec la distance. Néanmoins on peut la représenter comme suit : considérons la crémaillère de la *fig.* 39 ou même une tige lisse, comme une partie infinitésimale d'un circuit s'étendant jusqu'à New-York et retour; en quelque point imaginons une dynamo, une pile, ou toute autre cause électromotrice qui imprime à quelques-unes des roues le même mouvement qui serait produit par notre crémaillère. Ce mouvement se communique en tous sens dans le diélectrique avec une vitesse que nous pouvons considérer actuellement comme infinie, mais qui, en réalité, est celle de la lumière. A une certaine distance du fil, le mouvement tourbillonnaire est faible; il diminue en raison directe de la distance, mais près du fil et tout le long de celui-ci les roues opposées sont maintenues séparées et, là, la rotation est intense. Tout le long du fil se transmet donc un mouvement semblable à celui des *vortices*, comme dans la *fig.* 30, B, et en concentrant une partie de ce mouvement sur une petite aiguille, à la station éloignée, nous obtenons un signal visible.

C'est donc la fonction du fil de guider l'effet produit à travers le diélectrique. Le fil ne transmet rien, c'est la couche diélectrique qui transmet toute l'énergie : le fil ne fait que la diriger dans sa voie en tenant hors de prise les engrenages animés de mouvements de sens inverses.

Ainsi en est-il avec un fil parfaitement conducteur. Si nous avions un fil ordinaire, il agirait de même, seulement le glissement à la surface ne serait pas parfait : il serait accompagné de frottements. Ses propres roues sont mises en mouvement suivant des cylindres concentriques, à l'exception de l'axe qui reste en repos. Le phénomène de transmission est exactement le même, si ce n'est en deux points : en premier lieu, le fait d'avoir à mettre en mouvement les roues du fil peut retarder un peu la transmission, surtout si ces roues sont massives, comme dans le cas du fer, ou si le conducteur est très épais. En second lieu, les frottements dans le conducteur imparfait produisent une dissipation d'énergie et, par suite, la quantité d'énergie transmise est moindre. Mais observons encore que, bien que le fil absorbe de l'énergie, il n'en transmet pas; tout

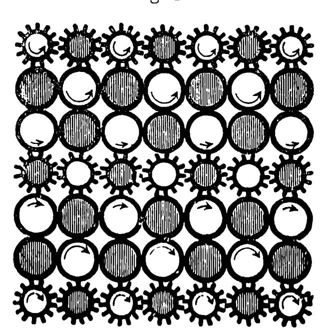
ce qui y pénètre est perdu, car c'est le diélectrique seul qui transmet.

Plus tard, nous verrons que l'engrènement dans le diélectrique n'a pas lieu rigidement, mais élastiquement, ce qui fait qu'un certain temps est nécessaire pour la propagation, et qu'il y a une vitesse de transmission. Mais, au fait, nous l'avons déjà vu, et nous savons déjà que certains diélectriques sont moins élastiques que d'autres (la gutta-percha l'est moins que l'air, par exemple), et par suite transmettent une perturbation plus lentement; mais toujours, comme nous le verrons, la vitesse est celle de la lumière dans le milieu considéré.

Force mécanique agissant sur un conducteur.

108. Dans la *fig.* 41, nous avons vu un conducteur dans lequel les côtés opposés sont le siège de rotations en sens

Fig. 44.



Attraction des deux courants parallèles et de même sens, produite par l'action de la force centrifuge des tourbillons extérieurs. La *fig.* 40 montre la répulsion des courants de sens inverse.

inverse. Ajoutons maintenant à ces mouvements une rotation uniforme, de manière à augmenter la vitesse dans certaines parties et à la diminuer dans les autres; immédiatement la force centrifuge, plus intense d'un côté que de l'autre, obligera toute partie mobile du conducteur à se déplacer des parties du

champ où la force est considérable dans celles où elle est faible.

Le champ produit par le courant direct et le courant de retour peut également être représenté par la superposition des tourbillons qu'ils produisent séparément (voir *fig.* 40); on voit alors de suite pourquoi un circuit tend à se développer, de manière à embrasser l'aire la plus grande possible, alors même qu'il n'est soumis qu'à l'action de son champ propre. De même, si deux circuits voisins et dans un même plan sont parcourus par des courants de même sens, leur effet se détruit plus ou moins dans l'espace intermédiaire, en donnant lieu à une ligne neutre. Les parties extérieures tendent alors à les rapprocher l'une de l'autre, par l'effet des pressions extérieures qui ne sont pas équilibrées par celles du milieu intermédiaire : des courants parallèles et de même sens s'attirent et *vice versa*.

109. En ce qui concerne l'effet produit par l'introduction d'un noyau de fer, on voit qu'il augmente des centaines de fois le nombre des tourbillons en augmentant d'autant les divers effets, aussi bien ceux relatifs aux forces mécaniques que les effets d'inertie.

On peut dire que dans le fer il y aura, par exemple, 1000 fois plus de tourbillons qu'il n'y en aurait autrement, et cela tant que le champ n'atteint pas une certaine valeur correspondant à la saturation. Lorsque tous les tourbillons propres au fer ont été orientés, il est saturé; mais, bien avant que ce point soit atteint, une autre cause entre en jeu pour diminuer l'action de ceux-ci : c'est la diminution d'énergie des tourbillons déjà orientés par suite de l'induction magnétique qui agit de manière à affaiblir les courants moléculaires. En sorte que, pour un état de saturation non encore atteint jusqu'ici avec le fer, l'aimantation, au lieu d'augmenter, peut diminuer. La perméabilité serait plus faible que 1, comme pour un corps diamagnétique.

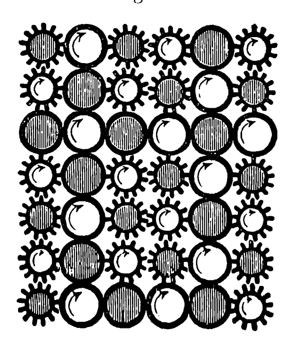
Le mode de représentation le plus simple consiste à attribuer aux tourbillons du fer une masse plusieurs centaines de fois plus grande que celle des tourbillons de l'air, de sorte que leur force vive est d'autant plus considérable.

La perméabilité magnétique correspond donc à une sorte de densité de l'éther. Cependant, on ne peut guère expliquer comment il se fait que l'éther ait une pareille inertie lorsqu'il est associé au fer. Peut-être faut-il attribuer ce fait à ce que les atomes de fer eux-mêmes se meuvent avec l'Électricité; mais toute autre supposition peut aussi être faite. Néanmoins, quelle que soit la cause des propriétés du fer, du nickel et du cobalt, il y aurait un intérêt tout spécial à essayer de s'en rendre compte d'après l'étude de leur structure moléculaire.

Induction dans un conducteur mobile dans un champ magnétique.

110. Il n'est pas très facile d'expliquer l'induction dans un conducteur qui se déplace dans un champ magnétique uniforme, parce qu'aucun de nos diagrammes ne conduit d'une

Fig. 45.



Section d'un champ magnétique uniforme, avec deux conducteurs parallèles et un conducteur mobile transversal.

Le déplacement de celui-ci produit une compression ou une dilatation des tourbillons intérieurs qui donnent lieu aux glissements correspondants aux courants induits.

manière naturelle et simple à l'idée de circuits de forme ou de grandeur variables.

Si nous supposons un circuit rigide placé dans un champ magnétique, comme dans la *fig.* 45, et que nous le fassions

tourner de 180°, il est évident qu'il y aura un courant induit, car tout se passe comme si le circuit était maintenu fixe et le champ, ou le sens des tourbillons, renversé.

Mais, pour comprendre l'induction d'un courant dans un circuit fermé dont une partie se déplace au travers des lignes de force, de manière à en embrasser un plus grand nombre, il faut se rappeler que les tourbillons intérieurs se dilatent et effectuent du travail en chassant le conducteur, tandis que les tourbillons extérieurs résistent au mouvement en étant comprimés et sont par suite rendus plus énergiques.

Ainsi les roues à l'intérieur tournent un peu plus lentement à mesure que le circuit se développe, et celles de l'extérieur tournent un peu plus vite. Ces deux effets produisent un glissement des molécules dans le conducteur, en premier lieu sur le pourtour intérieur et ensuite dans toute la masse, de sorte que l'Électricité positive se meut dans un certain sens tout autour du circuit, l'Électricité négative se déplaçant en sens inverse, ce qui correspond à un courant. Il ne faut pas supposer cependant qu'une expansion finie des tourbillons ait réellement lieu; le mouvement est rapidement égalisé par diffusion à travers le fil, et de nouveaux tourbillons pénètrent de l'extérieur; dès que le fil s'arrête, le champ est de nouveau uniforme, mais il y a maintenant un plus grand nombre de tourbillons à l'intérieur du circuit.

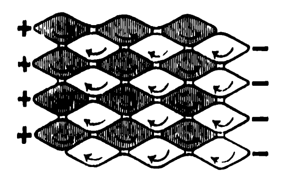
Représentation du champ électrostatique, en corrélation avec un champ magnétique perpendiculaire.

111. Une tension électrostatique est, comme nous le savons, causée par un déplacement d'Électricité positive dans un sens le long des lignes de force, et par un déplacement égal et inverse d'Électricité négative. Nous pouvons représenter assez exactement l'état du milieu au moyen de nos cellules élastiques (*fig.* 46).

Ici les cellules positives ont été déplacées d'un côté, les négatives de l'autre côté, et, quand la force est supprimée, le

milieu tend à revenir élastiquement à son état normal. Or, si toutes ces cellules sont remplies de tourbillons parallèles, comme dans les diagrammes magnétiques précédents, il n'est pas improbable que la distorsion électrostatique ou cisaillement puisse affecter légèrement les propriétés magnétiques, en sorte que, si la direction de la tension électrostatique était

Fig. 46.



Portion d'un champ électrostatique caractérisé par les tensions et pressions produites par la déformation de cellules élastiques.

On a supposé également qu'il existe des lignes de force magnétique perpendiculaires au plan de la figure. Lorsqu'un champ est excité et se propage de bas en haut, une légère tension sera produite dans les cellules. Inversement, l'établissement de la tension électrostatique donnera lieu à une accélération positive des tourbillons positifs et *vice versa*, en produisant un léger effet magnétique.

rapidement renversée, une légère oscillation magnétique s'ensuivrait. Mais, dans l'état actuel de nos connaissances, la nature exacte de ces actions mutuelles ne peut être définie.

Décharge disruptive.

112. On peut se représenter la *décharge disruptive* comme produite par le passage violent des cellules positives au travers des autres, le phénomène étant accompagné d'une véritable décomposition, une sorte d'électrolyse du milieu, et du passage des deux Électricités en sens inverse le long de la ligne de décharge.

Considérons le mouvement d'une rangée horizontale de cellules positives durant cette disruption. Les cellules glissent vers la droite, et pendant ce glissement la rotation des cellules négatives au-dessus d'elles est retardée, tandis que le mouve-

ment de celles qui sont en dessous est accéléré; il en résulte un véritable effet magnétique semblable à celui qui provient d'un courant, en sorte que la décharge disruptive présente toutes les propriétés magnétiques d'un courant.

Effets d'une charge mobile.

113. Ce déplacement d'une série de cellules positives ou négatives que nous venons de considérer se rapproche beaucoup du mouvement d'une charge à travers un diélectrique. Une charge ne peut exister qu'à la limite d'un conducteur et d'un diélectrique, ou encore à la limite de deux diélectriques de capacités différentes. Si donc un corps chargé se meut avec une extrême rapidité, on peut se représenter qu'il existe une rotation plus vive des cellules les plus voisines que des cellules éloignées, produisant ainsi les tourbillons caractéristiques du champ magnétique, en sorte qu'une charge mobile cause le même effet qu'un courant d'une certaine intensité. Il peut se faire, du reste, que ce soit précisément ainsi que le courant voltaïque est engendré; les forces chimiques d'une pile causent un mouvement des atomes chargés en produisant ainsi un champ, et celui-ci, en se propageant, atteint chaque partie du circuit métallique et y excite le courant.

Effets électrostatiques d'un champ magnétique mobile ou variable.

114. De même qu'un champ électrostatique mobile ou variable peut produire, comme nous venons de le voir, de faibles effets magnétiques, de même aussi on conçoit qu'un champ magnétique variable puisse produire des effets semblables à la tension électrostatique. Car un champ qui s'étend ou qui naît donne lieu à une propagation continue du mouvement de rotation d'une série de roues à l'autre; s'il y a un glissement quel-

conque, il y a production de courants induits, et la vitesse de propagation est comparativement faible, c'est une sorte de diffusion; mais, alors même qu'il n'y aurait pas de glissements, la propagation ne peut être infiniment rapide, tant que la rigidité du système n'est pas infinie. La vitesse réelle de propagation est très grande, ce qui montre que la rigidité est très grande aussi relativement à l'inertie, mais elle n'est pas infinie; il s'ensuit que la propagation de la rotation est accompagnée d'une tension temporaire.

Une partie du champ est dans un état de tourbillonnement énergique, une partie plus distante est encore au repos; entre les deux nous avons une région de tension, nos roues devant subir une torsion avant de transmettre le mouvement. Ainsi un champ variable doit produire une légère tension électrostatique temporaire dont la direction est normale à la direction des lignes de force et à celle suivant laquelle elles se déplacent.

Génération du champ magnétique. Induction dans les circuits fermés.

115. Représentons-nous un morceau de fer non aimanté : ses tourbillons existent, mais ils sont disposés en petits circuits fermés et ne produisent aucun effet extérieur. Si nous l'aimantons légèrement, quelques-uns de ces circuits magnétiques s'ouvrent et se développent, une partie passant dans l'air. Si nous l'aimantons davantage, nous aurons une série de ces circuits qui se développeront sous forme de *vortex* annulaires constituant les lignes de force magnétiques. Dans l'air ou tout autre corps, ces tourbillons existent également, quoique beaucoup plus faibles, et leurs axes forment de petits circuits fermés, peut-être à l'intérieur des atomes mêmes; mais en présence d'un courant ils se développent.

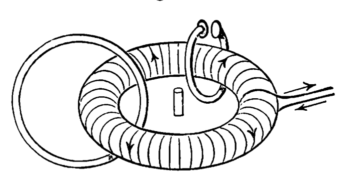
Prenons un anneau de fer ou un faisceau circulaire de fils; entourons-le d'un fil de cuivre, comme on le fait dans un *transformateur* (*fig.* 47) et envoyons-y un courant.

Les *vortex* fermés du fer se développent de suite et une

partie s'élance hors du fer à travers l'espace enveloppé par l'anneau, en pénétrant dans celui-ci par le côté opposé, en sorte que, aussitôt que le courant est établi, toutes les lignes de forces ont de nouveau dans le fer, mais enveloppent maintenant une aire définie, celle de l'anneau, au lieu d'être fermées sur elles-mêmes.

Dans un certain sens, le fer est toujours neutre au point de vue magnétique, puisque ses lignes de force forment encore des circuits fermés dans sa masse et ne s'étendent nulle part dans l'air. Mais, d'un autre côté, il est fortement aimanté et

Fig. 47.



Circuit magnétique fermé avec des conducteurs secondaires fermés ou ouverts.

d'une manière permanente; ce n'est que par l'action de courants alternatifs convenablement gradués qu'on arrive à le ramener à l'état neutre.

Notre anneau forme maintenant un grand *vortex* régulier, au lieu d'être un assemblable confus de *vortex* microscopiques.

Durant la période variable, lorsque le courant augmente ou lorsqu'il est renversé, la région intérieure à l'anneau et celle qui l'entoure sont remplies de myriades de lignes de force qui les traversent en s'élançant d'un côté du fer à l'autre. C'est la présence de ces lignes passant d'un de ces états à l'autre qui est la cause des puissants courants induits dans les transformateurs.

Toutes les fois qu'un champ magnétique varie, en fait, nous avons des lignes de force qui s'étendent en propageant leur mouvement tourbillonnaire et en produisant une certaine perturbation dans le milieu qu'elles traversent.

Considérons ainsi un aimant mobile ou animé d'une rotation autour de son axe; ses lignes de force se déplacent avec lui,

et comme elles constituent des courbes fermées, elles doivent également se déplacer dans le champ extérieur, en sorte que nous devons obtenir les mêmes effets que ceux qui proviennent d'un champ variable.

Lorsqu'une ligne de force extérieure et mobile coupe un conducteur, son mouvement est retardé, car les tourbillons glissent et ne peuvent que graduellement engendrer un tourbillon dans la masse du conducteur en donnant lieu à un courant induit.

Si un conducteur quelconque embrasse l'anneau de fer dont nous avons parlé (*fig.* 47), lorsque celui-ci est aimanté, les *vortex* qui s'étalent doivent nécessairement couper celui-ci et ils ne le coupent qu'une fois, quelle que soit sa forme, en sorte que la force électromotrice d'induction est parfaitement définie dans ce cas et est proportionnelle au nombre de spires du circuit induit.

Au lieu de supposer que celui-ci est fermé, prenons une boucle ouverte : il y a encore une force électromotrice induite, quoique moindre que précédemment, puisqu'une partie des lignes passent par l'intervalle ouvert sans produire d'effet; l'Électricité doit donc osciller d'une extrémité à l'autre, et un petit condensateur relié aux extrémités sera alternativement chargé et déchargé; même dans le cas où la boucle incomplète se réduit à une simple tige dans l'axe du tore, nous aurons encore des oscillations.

Mais, supposons qu'il n'y ait plus de conducteur du tout, il y aura néanmoins des déplacements électriques produits dans le diélectrique, chaque fois que l'aimantation de l'anneau sera renversée. Un corps chargé et délicatement suspendu à l'intérieur de l'anneau pourra subir l'effet de la faible tension électrostatique ainsi produite magnétiquement.

116. Pour nous représenter le mode suivant lequel le déplacement électrostatique a lieu dans l'espace embrassé par l'anneau, nous n'avons qu'à nous reporter à la *fig.* 42 et à considérer la série de roues situées le long de la ligne AB et qui séparent la section en deux moitiés. Elles ne peuvent tourner d'une manière continue ni d'un côté ni de l'autre, car elles

sont entraînées en sens inverse par les deux moitiés; en d'autres termes, il n'y a pas de champ magnétique dans le voisinage d'un anneau de ce genre, comme on le sait, du reste; mais néanmoins, durant la variation du champ, lorsque la vitesse des roues à l'intérieur change, le frottement sur le diélectrique, nécessaire pour empêcher les roues extérieures de tourner, augmente ou diminue; si donc les roues ont un jeu élastique, comme cela doit être, la tension électrostatique est altérée dans le champ tant que celui-ci varie.

QUATRIÈME PARTIE.

RADIATION.

CHAPITRE XII.

RELATION ENTRE L'ÉTHER ET L'ÉLECTRICITÉ.

---

117. Pour autant que nous ayons réussi à comprendre et à expliquer les phénomènes électriques, nous n'avons pu le faire qu'en supposant l'existence d'un milieu, pourvu de certaines propriétés mécaniques ou quasi-mécaniques, telles que la mobilité et l'incompressibilité ou élasticité infinie en volume combinée avec une sorte de plasticité ou élasticité de forme. Nous avons également supposé que ce milieu était formé de deux parties constituantes opposées, que nous avons appelées Électricités positive et négative, et dont la liaison est telle qu'elles se comportent exactement d'une manière inverse.

De plus, nous avons été conduit à donner à chacun de ces constituants une certaine masse ou inertie, et nous avons vu qu'il se produisait un phénomène semblable au frottement entre ces parties et la matière ordinaire.

D'une manière générale, on peut dire :

1° Que ce *frottement* se révèle dans les propriétés du courant ou des conducteurs qui sont résumées dans la loi d'Ohm, d'après laquelle le courant est proportionnel à la force qui le produit, ou bien que la résistance opposée par un conducteur est proportionnelle à l'intensité du courant;

2° Que l'*élasticité* est nécessaire pour expliquer les phénomènes électrostatiques ou les propriétés des diélectriques; le déplacement électrique et les décharges; le module de cisaillement, si l'on peut s'exprimer ainsi, étant mesuré par la capacité inductive spécifique K.

3° Que l'*inertie* se manifeste dans les phénomènes magnétiques, les densités relatives étant représentées par la perméabilité magnétique ou capacité inductive magnétique μ, exprimée pour chaque corps en fonction de celle de l'air.

4° Que la *dualité de constitution* du milieu est suggérée par les propriétés des électrolytes, par l'absence de force vive des courants ou des aimants, et par la difficulté qu'il y aurait sans cela à concevoir un milieu rigide et néanmoins parfaitement fluide relativement aux masses de matière ordinaire.

118. Avec notre hypothèse dualistique, cette difficulté disparaît. L'éther comme un tout peut parfaitement être fluide, et permettre aux corps de s'y déplacer sans résistance, tandis que ses deux composants peuvent être liés élastiquement et résistent aux forces qui agissent sur eux avec la rigidité voulue. Ainsi l'eau n'empêche pas un corps immergé de se mouvoir, mais exige une action spéciale pour être décomposée par électrolyse.

Ramenons la question à des idées familières. Nous sommes habitués à la conception de la matière et de l'éther, et nous savons que leur rapport est tel que, bien que la première semble se mouvoir librement dans l'éther, néanmoins, d'après les idées de *Fresnel*, une certaine partie de l'éther est entraînée avec les corps comme si elle leur était liée en quelque sorte. Nous allons plus loin, et nous analysons l'éther en deux constituants, égaux et opposés, pourvus chacun d'inertie et reliés entre eux par des liens élastiques que la présence de la matière ordinaire paraît, en général, affaiblir et même détruire. Ces deux constituants sont ce que l'on appelle respectivement l'Électricité positive et négative, et leur combinaison forme l'éther. Le lien qui les réunit est détruit dans les métaux et rendu moins rigide dans les isolants ordinaires.

La capacité inductive spécifique d'une substance corres-

pond à l'inverse de l'élasticité de l'éther binaire qui lui affère.

Le voisinage de la matière ordinaire paraît aussi rendre l'éther plus *dense*. Il est difficile de supposer qu'elle produise réellement une condensation d'un fluide incompressible; mais il est possible qu'elle agisse autrement pour l'alourdir (si l'on peut s'exprimer ainsi), de manière à produire l'effet d'une augmentation de densité. Dans le fer, cette densité atteint la plus haute valeur connue, et, dans chaque corps, la densité ou masse par unité de volume de l'éther n'est pas autre chose que la perméabilité magnétique μ.

119. Voyons un peu les résultats auxquels nous sommes arrivé jusqu'ici. Dans la première Partie, nous avons étudié des effets tout à fait analogues à ceux qui seraient produits par un milieu incompressible élastique (grossièrement assimilable au caoutchouc ou à une gelée). Dans les deuxième et troisième Parties, nous avons reconnu des effets qui suggèrent et nécessitent plus ou moins l'idée d'une propriété tout à fait analogue à l'inertie; de plus, nous avons été conduit à supposer une dualité de constitution du milieu, en sorte qu'il puisse être le siège d'efforts de cisaillement, bien que comme tout il agisse à la manière d'un fluide parfait. Actuellement, il s'agit de mieux préciser ces idées et ces analogies. Nous connaissons déjà un fluide incompressible qui remplit tout l'espace et que nous appelons l'éther. Supposons qu'il soit composé de deux parties constituantes, séparables par l'action de la force électromotrice; supposons que ces composants soient liés l'un à l'autre par une certaine ténacité, en sorte que le milieu ait une sorte d'élasticité au point de vue mécanique, et supposons enfin que ces deux composants possèdent de la masse ou puissent produire des effets d'inertie.

En faisant ces hypothèses, nous expliquons jusqu'à un certain point les phénomènes électriques.

Nous ne disons pas qu'ils soient expliqués en dernière analyse ou d'une manière absolue; il y a peu de choses qui puissent l'être; et nous avouons même qu'il reste encore bien des points à éclaircir, car la nature de la liaison entre les deux Électricités et entre leur composé l'éther et la matière, c'est-

à-dire la nature de la force et de l'inertie mises en jeu reste indéterminée.

C'est une limite de nos connaissances qu'il convient de reconnaître nettement; mais si c'était la seule lacune qui subsistât, si tout dans nos hypothèses était correct, nous aurions fait un grand pas en avant. On peut à peine espérer qu'il en soit ainsi et l'on doit admettre que notre ensemble d'hypothèses ne constitue qu'une grossière parodie de la vérité.

Que les propriétés que nous avons appelées élasticité et inertie électriques soient capables d'une conception plus claire et plus exacte, cela n'est pas douteux; néanmoins, comme elles permettent d'établir une réelle analogie, et que le milieu ainsi constitué en conjonction avec la matière peut donner lieu à tous les phénomènes électriques connus, cela nous engage à poursuivre notre conception dans d'autres directions, et à rechercher si certains phénomènes que l'on n'a pas l'habitude de considérer comme électriques ne pourraient peut-être s'expliquer également de la même manière.

C'est ce que nous allons voir.

120. Avant de poursuivre, définissons plus exactement ce que nous devons entendre par *élasticité électrique*. C'est une sorte d'élasticité chimique ou moléculaire [1]. Il y a une différence bien connue entre la force électromotrice et la force qui agit sur la matière pondérable. La première n'agit que sur l'Électricité en produisant un état de tension, en la mettant en mouvement ou, en général, en la *déplaçant*. Nous ne connaissons la nature ni de l'une ni de l'autre, mais nous pouvons dire que l'Électricité joue vis-à-vis de la matière le même rôle que la force électromotrice par rapport à la force mécanique. Ainsi de même, l'élasticité et l'inertie électriques sont-elles les

---

[1] Cette notion d'une sorte d'élasticité moléculaire électrique paraît s'être présentée à l'esprit de plusieurs savants, car, postérieurement, elle a été mise en avant par M. Lippmann, qui pense y trouver une explication suffisante des phénomènes qui précèdent l'électrolyse. (Voir *Comptes rendus de la Société franç. de Physique*, 7 mars 1890).

(*Note du Traducteur.*)

analogues de l'élasticité ou de la rigidité et de l'inertie ordinaires.

La masse (cause de l'inertie) est définie comme le quotient de la force par l'accélération ; de même, l'inertie électrique est le rapport de la force électromotrice à l'accélération du déplacement électrique ([1]).

Il est très possible que l'inertie électrique et l'inertie ordinaire soient une seule et même chose, comme l'énergie électrique ne diffère en rien de l'énergie mécanique. Si cela était démontré, ce serait un progrès vers une explication mécanique complète; rien ne le prouve, il est vrai, mais néanmoins notre analogie subsiste, et peut être poursuivie avec fruit.

D'après cette conception de l'*élasticité électrique,* l'eau ou les gaz sont électriquement élastiques ou rigides, quoique fluides mécaniquement; ils résistent aux forces électriques jusqu'à une certaine limite passé laquelle ils sont rompus, et ils reprennent leur état primitif quand elles ont cessé d'agir.

Le verre se comporte de la même manière, mais il est rigide également au point de vue mécanique, néanmoins les deux sortes de rigidités n'ont pas de rapport.

On comprend d'une manière générale pourquoi des fluides peuvent être électriquement ou chimiquement, moléculairement élastiques : c'est parce que leurs molécules sont complexes et que leurs parties constituantes sont liées, bien que les diverses molécules soient plus ou moins libres entre elles. Les forces mécaniques agissent sur les molécules et la masse entière peut être fluide; les forces électriques ou chimiques ont pour siège les constituants de la molécule; elles mettent en jeu une

---

([1]) Comme il est facile de s'en assurer, cette définition concorde avec celle qui a été donnée plus haut de la *densité électrique,* à la condition d'entendre par *force électromotrice* la force électrique E de Maxwell. Dans ce cas, en effet, le quotient $\frac{E}{\frac{d^2f}{dt^2}}$ est bien égal, à un facteur numérique près, à la perméabilité du milieu considéré.

(*Note du Traducteur.*)

réaction de cisaillement et tendent à les séparer. Pour ces forces, le fluide est élastique et tenace jusqu'à une certaine limite. Étendons ces notions à la constitution de l'éther et cherchons à en tirer les conséquences.

121. On nous permettra peut-être ici de conseiller au lecteur de parcourir les deux premières Parties à la lumière de ces dernières explications, en se rappelant que ce n'était qu'en vue de la simplicité que nous n'avons considéré tout d'abord qu'un milieu élastique ordinaire, sans chercher à rendre compte de son élasticité par une liaison entre deux parties constituantes. De là vient le caractère fortement artificiel de certains de nos modèles, par exemple de celui de la *fig.* 6, p. 23, où des perles fixes ont été introduites pour servir de supports aux liaisons élastiques. On conçoit maintenant, et du reste nous l'avions déjà indiqué dans la troisième Partie, que l'analogie sera bien plus satisfaisante en considérant deux sortes de perles disposées en séries parallèles alternées, reliées par des liens élastiques, et déplacées simultanément en sens inverse. Nous avons ainsi passé d'une sorte de théorie d'un fluide unique à une théorie des deux fluides modifiée, et nous avons des raisons de croire que, d'une manière ou d'une autre, cette dernière se rapproche davantage de la vérité.

Réaction élastique du milieu.

122. Nous devons maintenant considérer comment se comporte un milieu doué d'une rigidité ou élasticité k et d'une densité spécifique μ lorsqu'il est soumis à des déplacements élastiques ou à des tensions.

Un fait bien connu, c'est que, lorsque les tensions élastiques cessent d'agir, les particules déplacées reviennent partout à leur position primitive, la dépassent de l'autre côté, reviennent en arrière et continuent ainsi à osciller, jusqu'à ce que l'énergie qui leur a été communiquée soit dissipée par la viscosité ou les frottements internes. Si cette viscosité est considérable,

il n'y a même plus oscillation, le milieu revient seulement vers la position d'équilibre d'un mouvement amorti; théoriquement, il faut un temps infini pour qu'il reprenne exactement la position primitive, mais, en réalité, il peut revenir très rapidement à un état extrêmement voisin de l'état initial. La nature de ce retour à l'état initial dépend uniquement du rapport de la viscosité à la densité et à l'élasticité du milieu.

L'étude du mouvement est une simple question de Mécanique. Le mouvement de chaque particule est une oscillation pendulaire plus ou moins modifiée par un frottement fonction de la vitesse. Le cas relatif aux forces électriques est des plus simples, pour deux raisons : En premier lieu, parce que tant que la capacité ou constante diélectrique est constante (et l'on n'a jusqu'ici constaté aucune variation, au moins dans le vide et les gaz), la loi de Hooke s'applique exactement : la réaction élastique ou la tension est toujours proportionnelle au déplacement; en second lieu, parce que pour les conducteurs qui suivent la loi d'Ohm (et c'est le cas de tous les véritables conducteurs), la force de frottement est exactement proportionnelle à la vitesse.

123. On doit considérer deux ou au plus trois cas principaux. En premier lieu, le frottement est grand. Dans ce cas, le retour à l'état primitif se fait lentement et graduellement, suivant une fonction logarithmique du temps; le décrément logarithmique de celle-ci est indépendant de la densité et est égal au quotient du coefficient d'élasticité par le coefficient de résistance. A mesure que la résistance diminue, le mouvement de retour élastique devient de plus en plus rapide jusqu'à ce que l'inertie commence à jouer un rôle prédominant et augmente la durée de la perturbation en la prolongeant par des oscillations plus ou moins amorties.

Le retour à l'état d'équilibre a lieu le plus rapidement possible au moment précis où l'état oscillatoire commence, et l'on peut montrer que cela a lieu lorsque le coefficient de résistance est égal au double de la moyenne géométrique des coefficients d'élasticité et d'inertie. C'est ce qui constitue le second cas principal.

Le troisième cas a lieu lorsque la résistance est extrêmement faible, et que le mouvement devient franchement oscillatoire. Si la viscosité est réellement nulle, le mouvement est simplement pendulaire et indéfini, au moins s'il n'existe pas d'autres causes de dissipation. Autrement, le mouvement est une oscillation pendulaire amortie, c'est-à-dire que les amplitudes successives décroissent comme les ordonnées d'une courbe logarithmique. Dans ce cas, la durée d'oscillation est pratiquement indépendante du frottement; elle dépend seulement de l'élasticité et de l'inertie et, comme on le sait, elle est égale à 2π fois la racine carrée du rapport du coefficient d'inertie au coefficient d'élasticité.

124. Si nous voulons considérer le cas concret d'un problème électrique, nous pouvons prendre celui des oscillations électriques du circuit d'une bouteille de Leyde. Le coefficient d'élasticité est ici l'inverse de la capacité de la bouteille : plus celle-ci est considérable, moins est grande la réaction élastique pour un déplacement donné, en sorte que la capacité est l'inverse de la rigidité. Le coefficient d'inertie est ici ce qu'on désigne sous le nom de *self-induction* du circuit; il comprend l'inertie de la matière ou de l'éther déplacé. En modifiant convenablement la formule connue de la vibration pendulaire

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}},$$

nous aurons, en désignant par L l'inertie ou la self-induction du circuit et par C sa capacité ou l'inverse de la rigidité :

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

T étant la durée d'une oscillation complète. Au moment de la décharge, les oscillations commencent et elles continuent, comme le mouvement d'un diapason, tant que l'énergie n'est pas absorbée par la viscosité ou tout autrement.

125. Considérons précisément le diapason, et supposons que la matière dont il est formé soit absolument élastique,

c'est-à-dire dépourvue de viscosité, vibrera-t-il indéfiniment? Dans le vide peut-être, dans l'air certainement non, et cela parce qu'il est entouré d'un milieu qui peut lui-même entrer en vibration et qui propage le mouvement dans tout l'espace environnant. Lors donc que nous avons un corps vibrant dans un milieu convenable, il y a production d'une série d'ondes dans ce milieu, ondes qui sont transmises de proche en proche dans l'espace, à moins qu'elles ne viennent se dissiper dans d'autres milieux. L'énergie est donc transmise dans ce cas par le corps en vibration et elle apparaît sous quelque autre forme, là où les ondes radiantes sont absorbées ou détruites.

Les lois de la propagation des ondes sont bien connues; la vitesse avec laquelle elles se propagent à travers un milieu ne dépend en rien des propriétés du corps vibrant, source de la perturbation; elle ne dépend que des propriétés du milieu et elle est égale à la racine carrée du rapport de l'élasticité à la densité.

Quoique cette vitesse de propagation soit ainsi déterminée indépendamment de la nature de la source, la longueur de chaque onde dépend à la fois de la vitesse de propagation et de la durée de vibration de la source. Comme on le sait, et comme cela est du reste évident, la longueur d'onde est égale au produit de la vitesse de propagation par le temps d'oscillation.

126. Mais chaque milieu n'est pas susceptible de transmettre toutes sortes de vibrations ou d'ondulations. Il se peut que le mode de vibration du corps ou de la source soit entièrement différent des ondulations que le milieu peut transmettre. Dans ce cas, il ne peut y avoir aucune radiation. La seule radiation que les fluides matériels soient capables de transmettre mécaniquement est bien connue: c'est celle qui constitue le son. L'élasticité mise en jeu dans cette perturbation est l'élasticité de volume ou compressibilité. Mais les expériences électriques prouvent que l'éther est extraordinairement peu compressible, peut-être même tout à fait incompressible; dans ce cas, les vibrations de ce genre se propageraient avec une vitesse infinie et ne donneraient pas lieu à des ondulations proprement dites.

On peut concevoir et il semble même probable que la *gravitation* a lieu par des impulsions ou chocs longitudinaux de ce genre, et son action est par suite à peu près instantanée; sa vitesse de transmission, si elle est finie, pourrait être déterminée en reprenant les expériences de Cavendish ; néanmoins une véritable radiation transmise par l'éther ne peut avoir ce caractère d'ondes longitudinales. L'élasticité que possède l'éther doit être de la nature de la rigidité ; elle est mise en jeu par une sorte de cisaillement ou de distorsion produite non par des efforts mécaniques, mais par des tensions électriques ; c'est cette rigidité électrique qui est mise en jeu dans la transmission du mouvement ondulatoire.

Or, la décharge oscillatoire d'un condensateur est précisément propre à causer ces vibrations électriques de l'éther, et par suite, une oscillation électrique est la source d'ondes transversales électriques qui radient dans toutes les directions, avec une vitesse qui dépend des propriétés du milieu.

Ainsi, même dans le cas d'un circuit de conductibilité parfaite, la durée du mouvement serait limitée et l'énergie dissipée, non par frottements, car dans un circuit de ce genre il n'y aurait pas production directe de chaleur, mais par radiation ; cette dissipation ayant lieu de la même manière que le refroidissement d'un corps chaud, ou l'amortissement du mouvement d'un diapason monté sur une boîte de résonance. L'énergie du corps vibrant serait transférée graduellement au milieu ambiant, et transmise de là dans l'espace ; sa destination finale constitue une question tout à fait distincte, qui dépend de la nature et de la position des obstacles qui s'opposent à la propagation.

CHAPITRE XIII.

PROPRIÉTÉS DE L'ÉTHER.

Vitesse de propagation des radiations électriques.

127. La vitesse de propagation avec laquelle les ondes se transmettent dépend, avons-nous dit, seulement de la relation entre l'élasticité et la densité du milieu. L'élasticité considérée est naturellement celle qui est mise en jeu par les vibrations ; or celles-ci sont électriques ; c'est donc à l'élasticité électrique que nous avons affaire.

Cette sorte d'élasticité est du reste la seule que l'éther possède et sa valeur peut être déterminée, par les expériences électrostatiques, mais non en valeur absolue, par malheur. Ce n'est que l'élasticité relative de l'éther, et modifiée par la présence de la matière pondérable, qui a été mesurée : sa valeur réciproque est ce qu'on appelle la *capacité inductive spécifique* ou constante diélectrique, K.

La valeur absolue de K n'est pas connue jusqu'à présent, et ce n'est que par convention qu'on la suppose égale à l'unité pour l'air.

Cette convention est la base du système *artificiel* des unités électrostatiques.

Personne n'admet, ou au moins n'a le droit d'admettre, que sa valeur est réellement l'unité. Le seul essai de détermination

absolue de K a été fait par sir W. Thomson [1] qui a trouvé $\frac{1}{842,8}$.
Mais qu'elle soit connue ou inconnue pour le moment, la recherche de la valeur absolue de la constante diélectrique est un problème légitime que l'on peut espérer voir résoudre d'ici peu.

L'autre quantité dont dépend la vitesse de propagation est la densité du milieu, sa densité au point de vue électrique, dont nous ignorons également la valeur absolue. Sa valeur apparente ou relative dans les diverses substances est déterminée par les expériences magnétiques; c'est la perméabilité ou capacité inductive magnétique μ.

Ici encore on a dû faire une autre convention, absolument incompatible avec la première, et poser égale à l'unité sa valeur pour l'air. Cette convention forme la base du système artificiel d'unités électromagnétiques. Les deux conventions ne peuvent subsister simultanément, et il n'y a pas de raisons pour que l'une soit plus juste que l'autre. Sir W. Thomson a également cherché à déterminer la densité absolue de l'éther libre et a trouvé la valeur : $9,36.10^{-19}$.

128. Néanmoins, il faut bien admettre que les deux constantes fondamentales K ou $k = \frac{1}{K}$ et μ ne sont pas connues, quoique on puisse espérer les connaître un jour; ce qui n'empêche nullement d'exprimer la vitesse de transmission des ondes en fonction de ces quantités, car on sait que cette vitesse est donnée par la racine carrée de leur rapport

$$v = \sqrt{\frac{k}{\mu}} \qquad \text{ou} \qquad v = \frac{1}{\sqrt{K\mu}}.$$

C'est la vitesse avec laquelle les ondes quittent le circuit de décharge d'un condensateur ou de tout autre circuit parcouru par un courant alternatif et traversent l'espace. Ne connais-

---

(1) *Transactions R. S. Edimbourg*, t. XXI, p. 60; *voir* aussi l'article *Éther* dans l'*Encyclopédie Britannique*.

sant ni μ, ni K, nous ne pouvons calculer directement cette vitesse, mais nous pouvons essayer de l'observer expérimentalement.

120. Le premier essai grossier qui se présente à l'esprit consisterait à disposer un circuit secondaire voisin de notre circuit primaire parcouru par des oscillations, et à mesurer le temps nécessaire pour que la perturbation l'atteigne.

Par exemple, nous pourrions mesurer le temps qui sépare l'étincelle dans le circuit inducteur de l'étincelle induite. Mais ce mode opératoire est absolument insuffisant, la propagation est trop rapide.

Depuis que ces pages ont été écrites, le Dr Hertz, de Karlsruhe, a réussi à obtenir une mesure de cette vitesse d'après cette méthode. Naturellement, il n'a pas mesuré en réalité le temps qui s'écoule entre la fermeture du circuit primaire et l'origine du courant dans le circuit secondaire ; il n'a pas fait usage non plus d'une bouteille de Leyde, mais il a transformé les ondes progressives produites par un oscillateur électrique en ondes stationnaires, en les réfléchissant sur une surface métallique plane. De même que les ondulations qui se propagent dans une corde tendue sont converties en ondes stationnaires caractérisées par leurs nœuds et leurs ventres, par l'interférence des ondes directes et de celles qui sont réfléchies à l'extrémité fixe de la corde, de même des ondes progressives produites par un oscillateur électrostatique ou un corps relié à une bobine d'induction, sont réfléchies sur des parois métalliques et par interférence avec les ondes directes, donnent lieu aux nœuds et aux ventres stationnaires; l'intervalle nodal est alors égal à la demi-longueur d'onde.

En déplaçant maintenant un conducteur secondaire entre le primaire et les parois, on peut trouver des points de perturbation maximum ou minimum et mesurer la longueur d'onde. En calculant la période d'oscillation du circuit primaire, M. Hertz a pu déterminer indirectement la vitesse de propagation. Pour autant que nous le savons, elle concorde avec les valeurs obtenues par d'autres méthodes que nous allons examiner.

131. Nous pourrions également faire usage du principe du télégraphe électrique, c'est-à-dire étudier la propagation d'une perturbation le long d'un circuit unique, à partir de l'origine. Considérons un grand circuit fermé, parcouru ou non par un courant ; produisons en un point une perturbation, en introduisant brusquement une force électromotrice, ou une résistance si nous avions déjà un courant. A partir de ce point une perturbation rayonne dans l'éther comme le son rayonne autour du point où un choc a lieu.

Une succession régulière de perturbations causerait une succession d'ondes éthérées, ou une onde stationnaire ; une perturbation unique produira plutôt une impulsion ou un choc, mais la vitesse de transmission est la même dans les deux cas et nous pourrons guetter dans une station distante le moment de l'arrivée de l'onde. Comme cette station doit être très éloignée pour avoir un temps appréciable, il faut faire usage de quelque dispositif semblable aux tubes acoustiques pour concentrer la perturbation. Ce que le tube acoustique est au son, le fil télégraphique l'est à la perturbation éthérée.

C'est une curieuse fonction que remplit ce fil télégraphique ; il ne *conduit* pas les impulsions, il les dirige. Elles sont transmises directement par l'éther avec une vitesse propre. Toute perturbation qui atteint le fil y est rapidement dissipée en chaleur et ne se propage plus ; c'est le milieu isolant qui l'entoure qui transmet réellement.

Nous avons déjà insisté sur ce point dans la troisième Partie, et nous avons cherché à expliquer le mécanisme du phénomène.

Le point fondamental, c'est que le courant ne se propage pas par une poussée de fond, comme l'eau dans un tuyau, ou l'air dans un tube acoustique, mais par une série de tourbillons dont les axes sont normaux au fil qu'ils entourent, et qui glissent avec plus ou moins de frottements à sa surface. C'est la caractéristique de l'éther en général : il ne propage pas d'ondes longitudinales, comme dans le cas du son, mais il transmet des vibrations transversales, comme la lumière.

132. Le phénomène se passe à peu près de la manière sui-

vante : Considérons deux longs fils parallèles et rectilignes reliés l'un à l'autre en quelque point éloigné. A l'extrémité de chacun d'eux, produisons une impulsion électromotrice égale et opposée, par exemple, en y appliquant brusquement les pôles d'une pile ; ou bien supposons une série de variations produites par exemple par une machine à courants alternatifs. Les impulsions s'étendent à travers l'espace, mais en partant de phases opposées pour chacun des deux fils, en sorte qu'à une certaine distance les actions interfèrent et s'annulent pratiquement. Mais, près des fils, et en particulier entre eux, la perturbation peut être considérable. Dès qu'elle atteint le fil, elle y est dissipée, en sorte que l'énergie doit continuellement arriver aux fils, en venant toujours de l'extérieur. Si les fils étaient assez longs, il pourrait se faire qu'au moment où la perturbation atteint l'extrémité opposée, toute l'énergie soit pour ainsi dire déjà dissipée ; mais tant que l'onde rencontre le fil, l'énergie s'y dissipe, à moins que, par quelque mécanisme, on ne puisse l'absorber autrement et produire le signal désiré.

133. Or la vitesse avec laquelle s'effectue cette transmission de l'énergie dans la direction du fil est à peu près la même que dans l'espace libre. Il y a diverses circonstances qui peuvent retarder la transmission, aucune ne peut l'accélérer.

Les causes qui pourraient diminuer cette vitesse sont en premier lieu une sorte de *constriction* ou d'étranglement du milieu, par suite de la trop grande proximité des deux fils conducteurs ; c'est ce qui pourrait arriver dans le cas de deux rubans plats très voisins, qui ne laisseraient subsister entre eux qu'une couche infiniment mince de diélectrique, ou encore dans le cas de deux conducteurs concentriques dans les mêmes conditions. Avec un pareil dispositif, la transmission doit se faire entièrement par cette mince couche, il n'y a plus pour ainsi dire propagation ondulatoire, mais une sorte de diffusion sans vitesse bien définie, les diverses perturbations pouvant empiéter les unes sur les autres.

134. Une autre cause qui peut retarder la transmission, c'est la densité de l'éther dans la substance même du conduc-

teur et en particulier dans le cas du fer où elle est beaucoup plus forte. Or la dissipation d'énergie ne se fait pas rigoureusement à la surface, il y a une certaine pénétration; tant que la densité dans le fil est la même que celle du milieu, aucun retard n'en résulte, à moins que le fil ne soit très épais; mais s'il est en fer, c'est-à-dire si l'éther y est incomparablement plus dense, on comprend qu'il faille un certain temps avant que les tourbillons magnétiques ne soient excités, même dans la couche extérieure. Cependant, cet effet n'altère en rien le caractère de la transmission, il correspond seulement à une légère augmentation de la densité moyenne du milieu.

135. Il y a donc deux phénomènes principaux qui affectent la vitesse de transmission d'une perturbation d'un point d'un circuit à un autre: l'inertie supplémentaire provenant d'une grande perméabilité magnétique du conducteur ou de ses couches extérieures, et une constriction ou étranglement du milieu au travers duquel la transmission se fait réellement. Ces deux effets diminuent la vitesse de propagation et l'un d'eux, le dernier mentionné, modifie les lois de la transmission, en oblitérant le caractère des diverses ondes et en détruisant la netteté et l'indépendance des ondes élémentaires.

Naturellement, à côté de ces deux effets, la nature même du milieu isolant joue un rôle et affecte la vitesse de transmission, qui doit être déterminée pour chaque milieu.

136. Les conditions accessoires que nous venons d'énumérer, au contraire, ne dépendent pas du milieu et l'on doit chercher à les éliminer en employant des fils de cuivre aussi fins que possible, disposés à une certaine distance. Nous observerons alors le temps qu'une impulsion électromotrice communiquée à une extrémité met pour arriver à l'autre. Au lieu d'employer deux fils, nous pouvons faire usage du sol comme fil de retour; ce cas correspond à peu près à celui de deux fils dont la distance serait le double de la hauteur du conducteur unique au-dessus du sol.

L'expérience, si elle pouvait être exécutée dans de bonnes

conditions, donnerait comme vitesse de propagation 3×10^{10} centimètres par seconde [1].

La vitesse réelle pourrait être un peu plus faible, pour les raisons mentionnées, mais elle ne serait certainement pas supérieure. Cette vitesse est celle de la transmission de vibrations transversales dans l'éther libre.

137. L'auteur a réussi à faire une détermination préliminaire et approchée par cette méthode grossière, mais en évitant la nécessité d'avoir une longueur considérable de fil en employant le principe de la réflexion et des interférences pour obtenir des ondes stationnaires dans un couple de fils parallèles de longueur connue, disposés en dérivation sur le circuit d'une bouteille de Leyde. Des impulsions alternatives parcourent ces fils et sont réfléchies à leur extrémité la plus éloignée, exactement comme les vibrations se propagent dans un fil fixé à un diapason dans l'expérience de Melde. La réflexion aux extrémités ne va pas sans une réaction violente ou choc, qui peut être observé par le renforcement des étincelles ainsi obtenues ou leur allongement. La longueur des fils ou les dimensions du circuit de décharge sont réglées jusqu'à ce que ce choc électrique soit au maximum; la longueur de chaque fil donne alors la demi-longueur d'onde. Connaissant la vitesse d'oscillation propre au circuit de la bouteille employée, on peut déterminer la vitesse de propagation des ondes. Elle coïncide avec les chiffres obtenus par d'autres méthodes.

138. Il y a du reste bien des méthodes connues des physiciens qui permettent de déterminer indirectement cette vitesse, et qui sont plus faciles à réaliser que celle indiquée.

---

(1) Cette expérience a été tentée depuis bien longtemps sur les fils télégraphiques par MM. Wheatstone, Fizeau, Gonelle, etc., et dans ces dernières années par M. Hagenbach de Bâle, mais dans des conditions qui ne permettent pas d'obtenir la véritable vitesse de transmission de l'onde électromagnétique. Aussi les valeurs trouvées ainsi pour la *vitesse de l'Électricité*, comme on disait alors, s'écartent absolument de la limite théorique prévue déjà par Kirchhoff en 1811.

(*Note du Traducteur.*)

Elles permettent de déterminer directement le rapport $\frac{k}{\mu}$ ou, ce qui revient au même, le produit $K\mu$, que la théorie nous indique devoir être égal à l'inverse du carré de la vitesse de transmission des ondes électriques dans l'éther libre.

Ce sont les méthodes dont on se sert pour déterminer le rapport v ou le nombre d'unités électrostatiques de courant contenues dans l'unité électromagnétique.

CHAPITRE XIV.

RADIATIONS ÉTHÉRÉES OU LUMIÈRE.

139. Ayant déterminé le rapport des deux constantes de constitution de l'éther, K et μ, par une expérience sur un circuit de dimensions considérables, revenons maintenant à la considération de circuits ordinaires.

Si les courants alternatifs sont produits artificiellement par quelque forme de machines alternatives, leur période est naturellement arbitraire; mais si elles sont produites par l'oscillation naturelle de la charge d'un condensateur leur fréquence, c'est-à-dire le nombre d'oscillations complètes par seconde, est, comme nous l'avons déjà dit, de

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

où L est le coefficient d'inertie ou de self-induction du circuit et C sa capacité ou l'inverse de l'élasticité électrique.

140. Nous ne voulons pas entrer ici dans le détail de la détermination de L, mais, d'une manière grossièrement approchée, on peut l'estimer à douze ou quinze fois la longueur du circuit multipliée par la constante μ relative au milieu, dans le cas d'une simple boucle se rapprochant de la forme d'une circonférence.

La valeur de C dépend des dimensions du condensateur et

de la nature de son diélectrique; elle est donnée par la formule bien connue

$$C = \frac{S}{4\pi a} K.$$

Le produit LC contient donc deux facteurs, tous deux des dimensions d'une ligne et dépendant de la grandeur du circuit, et le facteur $K\mu$ qui ne dépend que des propriétés du milieu. Donc, en ce qui concerne l'éther, il suffit, pour calculer l'expression ci-dessus, de connaître seulement le *produit* des deux constantes K et μ, et, comme ce produit est déterminé par notre expérience sur la vitesse de transmission, nous pouvons calculer la période d'oscillation d'un circuit donné. On peut alors calculer aisément la longueur d'onde; car s'il y a n ondes produites par seconde, et que leur vitesse de transmission soit v, la longueur de chacune d'elles est $\frac{v}{n}$.

Par suite, cette longueur d'onde est donnée par la formule

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{L}{\mu}\frac{C}{K}}.$$

141. Si nous effectuions ce calcul dans le cas d'un condensateur ordinaire avec un circuit de dimensions de l'ordre du mètre, nous trouverions des ondes d'une centaine de mètres de longueur; naturellement plus le circuit est grand, plus la longueur d'onde est grande aussi.

Un condensateur de 1 microfarad déchargé à travers une bobine ayant une *self-induction* de 1 secohm donnerait lieu à des ondes de 1900^{km}. Une bouteille de Leyde ordinaire déchargée par un excitateur pourra donner des ondes d'une vingtaine de mètres. Une bouteille de la grandeur d'un verre se déchargeant d'elle-même par ses bords pourra produire des ondes de 1^m de long.

142. Les oscillations du courant qui donnent ainsi lieu à des oscillations éthériques n'ont qu'une faible durée, tant qu'on ne les entretient pas par une source. Cette durée dépend natu-

rellement de la conductibilité du circuit, mais alors même qu'on aurait affaire à un circuit parfait, elles finiraient par s'éteindre d'elles-mêmes par le seul fait qu'elles donnent lieu à une dissipation d'énergie par radiation. On pourra percevoir peut-être 100, 1000 ou même 100 000 oscillations d'amplitudes décroissantes, mais leur période est si courte que la durée totale pourra n'être qu'une fraction minime de la seconde. Par exemple, pour obtenir une longueur d'onde de 1^m, il faut 300 millions d'oscillations à la seconde.

Pour maintenir une radiation continue, il faut naturellement une source d'énergie. Les machines dynamos à courants alternatifs ne sont que des mécanismes artificiels et encombrants, destinés à maintenir des vibrations électriques dans des circuits de résistance finie; dans tous les cas de la pratique, la perte par radiation n'est du reste qu'une fraction absolument négligeable de l'énergie totale. Mais il est possible d'imaginer d'autres méthodes moins directes, une méthode chimique par exemple, qui permettrait d'entretenir un système d'ondes stationnaires.

143. Nous avons vu que la longueur d'onde diminue continuellement à mesure que le circuit devient plus petit. Réduisons celui-ci encore davantage, et voyons pour quel ordre de grandeur du circuit nous obtiendrons des ondes de 6 dix-millionièmes de mètre (0,6 micron); il suffit de poser

$$2\pi\sqrt{\frac{L}{\mu}\frac{C}{K}} = 0{,}00006,$$

ce qui nous montre que le circuit devrait avoir des dimensions telles que la moyenne géométrique du coefficient de self-induction exprimé en unités électromagnétiques et de la capacité exprimée en unités électrostatiques soit égale à 10^{-5} centimètre (0,1 micron). Cela revient à dire que le circuit devrait être de dimensions atomiques, et suggère immédiatement l'idée que ces ondulations éthériques ultra-microscopiques, qui affectent notre rétine en y produisant l'impression de lumière, pourraient bien, en réalité, être excitées par des oscillations électriques ayant les atomes pour siège.

Si, après que les oscillations ont été une fois excitées, elles ne sont maintenues par aucune source d'énergie, la production de lumière cessera bientôt et nous aurons les phénomènes temporaires de la phosphorescence; dans le cas contraire, la radiation, au lieu de produire une lueur passagère, donnera lieu à une lumière continue.

Rapport entre la vitesse des ondulations électriques et la vitesse de la lumière.

144. Nous sommes ainsi arrivés à la conclusion de la théorie bien connue de Maxwell, à savoir que la lumière est produite par des vibrations électriques et que ses ondes sont des ondes électriques.

Mais quelles preuves peut-on trouver de cette hypothèse, à part le simple fait que nous venons de rappeler, que des ondes semblables en tout point à celles de la lumière, si ce n'est en ce qui concerne l'ordre de grandeur, c'est-à-dire des vibrations transversales transmises avec une certaine vitesse à travers l'éther, peuvent être produites d'une manière temporaire dans des circuits donnés, et *pourraient* même correspondre à toutes les longueurs d'ondes lumineuses si nous pouvions employer des circuits ultra-microscopiques? Le premier point à considérer est de vérifier si les vitesses de propagation des deux sortes d'ondes sont identiques dans les mêmes conditions.

Nous avons décrit une méthode possible pour mesurer la vitesse de propagation de l'onde électrique, il y en a plusieurs autres ; elles conduisent toutes à une vitesse de 300 000^{km} par seconde. Or, il y a longtemps que l'on a mesuré la vitesse de la lumière dans l'espace libre ou dans l'air, et cette vitesse a également été trouvée de 300 000^{km} par seconde. Les deux vitesses sont donc identiques dans le cas de l'éther libre. On peut donc être sûr que les radiations lumineuses et électriques sont identiques.

145. Mais il y a une autre confirmation. La vitesse de la radiation électrique n'est pas la même dans tous les milieux; elle dépend de la densité et de l'élasticité éthérique de chaque substance, puisqu'elle est donnée, comme on sait, par la relation

$$v = \frac{1}{\sqrt{K\mu}}.$$

Or, bien que les valeurs absolues de K et de μ soient inconnues, nous connaissons leurs valeurs relativement à l'air pour un grand nombre de substances.

Il est également facile de comparer la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans l'air et dans un autre milieu. Le rapport de ces deux vitesses n'étant autre que l'indice de réfraction de la substance considérée, la réciproque de l'indice de réfraction nous donne par conséquent la vitesse relative de la lumière. Soit n l'indice de réfraction, nous devons donc avoir, si la théorie électromagnétique de la lumière est juste,

$$n^2 = K\mu.$$

146. On ne peut affirmer que cette relation soit exactement vérifiée pour tous les corps. Pour quelques-uns, l'accord est très satisfaisant; mais d'autres constituent des exceptions. Il nous reste donc à voir si ces exceptions ne sont qu'apparentes et à quoi elles sont dues.

Il faut bien comprendre quel est le point essentiel de la question. On a prouvé par diverses méthodes, et avec une approximation d'autant plus grande que les méthodes sont plus parfaites, que les perturbations électriques sont transmises avec une vitesse égale à celle de la lumière dans l'espace libre ou dans l'air; en d'autres termes, qu'il n'y a pas de différence au point de vue de la vitesse de transmission entre des ondes de plusieurs milliers de kilomètres de longueur et des ondes si courtes que des milliers tiennent dans un millimètre. Cela est juste pour l'éther, ce qui est remarquable, car ce fait prouve déjà que l'éther doit être continu, homogène et plus simple comme structure que n'importe quel corps. En tout

cas, s'il possède une certaine hétérogénéité de structure, les parties composantes sont tellement petites que des centaines de kilomètres et le micron sont des quantités pratiquement du même ordre de grandeur par rapport à leurs dimensions; ces particules se comportent de la même manière pour toutes ces longueurs d'ondes.

Mais, dès que nous avons affaire à la matière pondérable, nous savons bien que tel n'est plus le cas. La matière est composée de molécules qui, bien que petites, sont loin d'être infinitésimales. Les atomes sont certainement plus petits que les longueurs d'ondes lumineuses les plus courtes, mais non incomparablement plus petits.

Par suite, il est naturel de penser que l'éther modifié par la présence de la matière acquiert une certaine hétérogénéité, et par suite ne peut plus se comporter de la même manière pour des ondes de toutes longueurs.

La vitesse de toutes les ondes est retardée lorsqu'elles pénètrent dans la matière pondérable, mais il est naturel de supposer que les ondes les plus courtes subiront l'effet le plus considérable. Le phénomène est bien marqué, même dans les limites des ondes lumineuses qui affectent la rétine. Les plus courtes, celles qui correspondent aux rayons violets, sont plus retardées et sont transmises plus lentement, par exemple à travers le verre ou l'eau, que celles, plus longues, qui correspondent aux rayons rouges. Ce phénomène, connu depuis longtemps, n'est autre chose que la dispersion. Par suite, il est difficile de prévoir quelle sera la vitesse d'ondes d'une longueur de quelques mètres ou de quelques kilomètres en se basant sur la vitesse des ondes lumineuses ultra-microscopiques.

147. Mais il y a plus encore : il n'y a pas seulement dispersion ; la matière possède encore une action sélective d'absorption ; non seulement elle transmet chaque onde avec une vitesse propre, mais elle en absorbe quelques-unes davantage que les autres. Peu de corps, et peut-être aucun, ne sont également transparents pour tous les rayons. Le verre, par exemple, qui transmet parfaitement les ondulations lumineuses

qui affectent la rétine, est pratiquement opaque pour les rayons de longueur d'onde quelques centaines de fois plus courtes ou plus longues. Et, partout où cette action sélective s'exerce, les lois de la dispersion sont complexes, si complexes, que cette dispersion est souvent traitée *d'anomale*, ce qui ne veut pas dire qu'elle ne suit pas de lois, mais que celles-ci sont inconnues. La dispersion elle-même est du reste un problème obscur et mal connu, mais la dispersion modifiée par l'absorption sélective est encore plus compliquée. Tant que la théorie de la dispersion n'est pas mieux établie, personne ne peut déterminer d'avance la vitesse de transmission de rayons de longueur d'onde donnée ; on ne peut que déterminer expérimentalement cette vitesse.

C'est ce qu'on a fait pour des ondes électriques d'une longueur considérable, et pour les courtes ondes des rayons lumineux.

Dans quelques cas, la vitesse est la même ; dans d'autres, elle est différente. Mais il est naturel que ces vitesses soient différentes et l'on n'en doit pas du tout conclure que les ondes électriques et lumineuses soient essentiellement différentes. Il est remarquable que ces vitesses coïncident, comme cela a lieu dans l'air, et soient très voisines dans le cas de substances simples, comme le soufre, et aussi dans les hydrocarbures qui constituent la paraffine, tandis que c'est pour des corps artificiels comme le verre, ou dans les substances organiques telles que les huiles grasses, que la concordance est la moins parfaite.

Mais en voilà assez sur cette question essentielle de la vitesse de propagation des perturbations électriques et lumineuses. Dans quelques cas, ces vitesses sont identiques ; elles ne diffèrent jamais énormément, et dans tous les cas où l'accord n'est que grossier, on peut invoquer le fait que jusqu'ici on n'a expérimenté qu'avec des ondes de longueurs très différentes.

Pour pouvoir vraiment comparer les vitesses, nous devons, ou bien arriver à obtenir des ondes électriques plus courtes, ou bien produire des ondes lumineuses plus longues et les comparer dans les mêmes conditions.

Nous n'avons aucune raison sérieuse de douter que l'accord ne serait alors complet.

Production artificielle de la lumière.

148. Les conclusions auxquelles nous sommes arrivés, que la lumière est une perturbation électrique et que des ondes lumineuses sont excitées par des oscillations électriques, peuvent avoir plus tard et peut-être sous peu une importance pratique réelle.

Nos moyens actuels de production de la lumière sont peu efficaces et coûteux.

Nous avons besoin de certaines vibrations dont la rapidité varie de 4000 à 7000 trillions d'oscillations par seconde. Toutes les autres sont inutiles, car elles n'affectent pas notre rétine.

Malheureusement, nous ne savons pas produire de vibrations aussi courtes. Nous pouvons obtenir des vibrations définies à raison de quelques centaines ou même de quelques milliers par seconde ; en d'autres termes, nous pouvons produire des sons d'une tonalité définie, et nous pouvons les entretenir au moyen de dispositifs variés. Nous pouvons également, quoique le fait soit moins connu, exciter momentanément des ondulations éthériques à raison de quelques millions de vibrations par seconde, comme nous venons de le voir ; mais, jusqu'ici, nous ne savons comment maintenir d'une manière continue ces oscillations.

149. Pour obtenir des longueurs d'ondes encore plus courtes, il faut agir directement sur les molécules.

Nous savons comment faire vibrer les molécules : c'est ce que nous faisons quand nous « échauffons » un corps, et il est possible que si nous pouvions agir sur les molécules isolées, de manière que leurs mouvements n'interfèrent pas, nous pourrions produire des vibrations définies. Mais, alors même que cela serait possible, le but ne serait pas atteint car les molécules ayant une multitude de modes vibratoires, dont quelques-uns seulement sont utiles, nous ne pourrions

obtenir les uns sans les autres. En réalité, comme nous avons affaire à des masses complexes, les modes de mouvements sont en nombre infini.

Nous prenons un corps, par exemple un filament de lampe à incandescence ou un morceau de chaux vive; en élevant sa température, nous communiquons aux atomes un mouvement de plus en plus rapide, non en transformant les vibrations lentes, mais bien plutôt en superposant les uns aux autres les divers modes d'oscillation jusqu'à ce qu'enfin nous obtenions aussi les vibrations auxquelles notre rétine est sensible. Combien coûteux, indirect et empirique est un pareil procédé; nous voulons des vibrations rapides, et nous ne savons mieux faire que de produire toute la série. C'est comme si, pour obtenir de légers sons de flûte dans un orgue, nous étions obligés de manœuvrer toutes les touches et toutes les pédales et de déchaîner un véritable ouragan.

150. Du reste, nous avons eu soin de choisir comme exemple le mode d'éclairage le plus parfait, celui dans lequel les radiations inutiles ne produisent du moins pas d'effets nuisibles. Mais l'ancienne méthode, qui consiste simplement à faire brûler n'importe quoi, est encore plus sauvage; non seulement le corps éclairant brûle, mais l'air se vicie, et pour une fraction infinitésimale que nous utilisons, il nous faut supporter la chaleur de foyers intenses.

Chacun sait que la combustion n'est pas un moyen commode ni hygiénique d'obtenir de la lumière, mais tout le monde ne se rend pas compte du fait que l'éclairage électrique lui-même n'est guère satisfaisant au point de vue du rendement et qu'il n'est sans doute qu'un procédé transitoire destiné à ne vivre que quelques lustres ou un siècle à peine.

Considérez les foyers et les chaudières d'une grande usine d'éclairage électrique avec ses moteurs à vapeur et ses machines dynamos, et calculez l'énergie dépensée; d'un autre côté, regardez les filaments incandescents et estimez quelle fraction de l'énergie fournie est réellement utilisée par nos yeux. C'est à peu près ce que la puissance sonore d'un diapason est à celle d'un orchestre entier.

On peut dire sans exagération qu'un homme attelé à une manivelle pourrait suffire à entretenir la lumière produite, si toute l'énergie etait utilisée, et remplacerait l'usine entière.

151. On pourrait penser à première vue qu'il est contraire aux lois de la nature d'espérer produire et utiliser un mode défini de radiation à l'exclusion des autres, mais il n'en est rien, comme M. Rayleigh l'a montré et cette recherche est légitime.

Sans doute, nous n'en avons pas encore le moyen, il ne reste qu'à le trouver.

Chacun de nous a vu des vers luisants, et a dû être frappé de voir cette lumière qui n'est produite ni par une combustion, ni par quelque phénomène électrique. Dans le cas de la phosphorescence, il y a bien peu d'énergie radiante perdue ; les rayons capables d'affecter notre rétine sont produits directement et il suffit pour cela d'une énergie infime, même pour produire des quantités considérables de lumière.

La lumière solaire consiste en rayons de toutes longueurs d'ondes, c'est vrai, mais son but n'est pas seulement de rendre les objets visibles. Tout rayon solaire est utile. Au contraire, dans l'éclairage artificiel, ce n'est que la lumière que l'on vise; si l'on a besoin de chaleur, il vaut mieux la produire à part par combustion ou de toute autre manière. Aussi, dès que l'on sera familiarisé avec cette idée que la lumière n'est qu'une oscillation ou une onde électrique, on commencera à chercher un moyen d'exciter et de maintenir des oscillations électriques de la fréquence voulue.

Alors seulement, on pourra dire que le problème de l'éclairage artificiel est résolu.

Voyons maintenant ce qui concerne les propriétés de ces ondes électriques.

Mécanisme de la radiation électrique.

152. En nous représentant une onde électrique, nous devons noter qu'il y a trois directions distinctes à considérer : 1° la

direction de la propagation, soit la ligne suivant laquelle l'onde avance; 2° la direction du déplacement électrique qui est normale à celle-ci; 3° enfin la direction de la force magnétique, normale à l'une et à l'autre des deux premières.

Nous pouvons nous faire une grossière représentation mécanique du phénomène de la radiation électrique (au moins dans un plan) au moyen du modèle à roues dentées dont nous avons parlé dans la troisième Partie. Imaginons une série de roues élastiques engrenant toutes dans un plan et faisons-en osciller une autour de son axe; à partir de cette roue, l'oscillation va s'étendre dans toutes les directions, chaque roue oscillant d'une manière semblable et transmettant son mouvement à ses voisines. Considérons ce qui se passe à une certaine distance de la source ou de l'origine de l'ébranlement: nous voyons que le mouvement se communique par exemple de gauche à droite; le déplacement électrique ou le déplacement des points de contact a lieu de bas en haut; enfin les axes des mouvements alternatifs des roues sont perpendiculaires au plan de celles-ci. Le déplacement électrique est petit parce que les roues positives et négatives engrenant entre elles se meuvent presque également et, par suite, les unes l'emportent seulement sur les autres alternativement à cause de l'élasticité des roues. Les oscillations magnétiques, d'un autre côté, ont toutes lieu dans un sens, les roues positives tournant dans un sens, et les roues négatives en sens inverse, en agissant de la même manière, en sorte que l'oscillation magnétique est plus apparente que l'oscillation électrique et l'on désigne plutôt le phénomène sous le nom de *radiation électromagnétique*. Mais l'énergie de la tension électrostatique est aussi grande que celle du mouvement électromagnétique; en fait, l'énergie passe alternativement de la forme potentielle à la forme cinétique ou *vice versa* à chaque quart de période, exactement comme dans tout autre cas de mouvement vibratoire.

153. En réalité, les oscillations magnétiques sont extrêmement minimes. En effet, le système de roues s'étend à l'infini dans tous les sens, et, si elles étaient parfaitement rigides, une force finie ne pourrait faire tourner l'une quel-

conque d'entre elles. Mais comme elles sont élastiques, ce mouvement peut avoir lieu, bien qu'avec une amplitude très faible; il provoque un état de tension qui se propage rapidement de tous côtés. Si la source était située à l'intérieur d'un conducteur parfait de dimensions restreintes; si, par exemple, on faisait osciller l'une des roues du contour plein de la *fig.* 38, ce serait relativement aisé, les roues étant en petit nombre pourraient être amenées à osciller fortement avec une faible cause perturbatrice.

La concentration de la lumière par réflexion est un phénomène bien connu; or, comme un conducteur joue le rôle d'un miroir parfait et qu'aucune fraction de la lumière ne le traverse, il semble qu'on pourrait obtenir un éclairement quelconque à l'intérieur d'un miroir sphérique de conductibilité parfaite.

Une disposition de ce genre ne serait cependant pas utilisable, car dès qu'une parcelle matérielle serait introduite à l'intérieur pour recevoir cet éclairement, il y aurait destruction de la vibration lumineuse à sa surface et la violence du mouvement éthérique serait immédiatement atténuée.

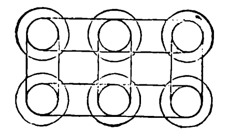
Néanmoins, même en tenant compte de cette dissipation, et du fait que la surface réfléchissante n'est nullement un conducteur parfait, mais un simple miroir d'argent, il y a réellement une augmentation considérable de l'illumination produite par cette réflexion, comme on dit généralement, ou mieux par cette limitation dans une direction, de l'étendue du milieu éthéré affecté par la source.

154. Le professeur Fitzgerald, de Dublin, a imaginé un modèle mécanique de l'éther qui, à l'aide d'une convention, représente les deux sortes de déplacements d'une manière très claire et très simple. Les roues (*fig.* 48), au lieu d'engrener, comme dans nos modèles, sont séparées les unes des autres par un certain espace, et reliées par des cordons élastiques. Elles tournent ainsi toutes dans le même sens, et il n'y a pas lieu de distinguer entre les deux Électricités.

Mais les roues ayant de la masse, un mouvement de rotation donné à l'une met un certain temps pour se communiquer à la série, la vitesse dépendant de l'élasticité des cordons et

du moment d'inertie des roues; durant la période d'accélération, un brin de chaque cordon est tendu, tandis que l'autre est relâché et devient ainsi plus épais. Cet épaississement des brins a lieu dans une direction et correspond au déplacement électrique dans cette direction, qui est normale à la direction

Fig. 48.



Modèle de M. Fitzgerald représentant la constitution de l'éther.

de propagation de la perturbation et aux axes des roues. Une série de roues correspond à une section du plan d'onde, et, par suite, le déplacement du caoutchouc et la rotation des axes, c'est-à-dire les perturbations électriques et magnétiques sont toutes deux dans le plan d'onde.

155. Le mode de représentation indiqué en premier lieu par Clerk Maxwell ne différait pas beaucoup de celui-ci (¹). Il consistait en une série de roues douées de masse, et reliées entre elles, non par des rubans élastiques, mais par une couche de particules élastiques ou *roues auxiliaires*. Ces particules représentaient l'Électricité, leur déplacement durant la période d'accélération correspondant à l'épaississement des brins élastiques de M. Fitzgerald.

L'auteur a proposé de prendre une double série de roues engrenant directement, et représentant respectivement les deux Électricités, parce qu'il lui paraît qu'il y trop de faits qui conduisent à l'idée de ces deux entités séparées. En outre, il n'y a pas lieu de distinguer entre une partie du milieu représentant l'éther et une autre l'Électricité; le tout constitue l'éther mais aussi l'Électricité, bien que, néanmoins, il faille absolument faire une distinction entre un mouvement de

(¹) *Phil. Mag.*, avril 1861.

l'éther, considéré comme un tout, et un mouvement relatif de ses parties constituantes. Il faut, en effet, bien distinguer entre une force capable de faire mouvoir l'éther, c'est-à-dire de déplacer le centre de gravité d'une partie finie, et une force qui le cisaille en quelque sorte, et oblige ses composantes à glisser l'une sur l'autre en sens inverse. Cette dernière force est la force électromotrice proprement dite.

156. Si maintenant nous voulions essayer d'expliquer l'élasticité de l'éther, il nous faudrait faire appel à la théorie des *vortex spongieux*, suggérée par M. Hicks (1), et développée dernièrement par sir W. Thomson (2). Mais la matière est trop compliquée pour pouvoir être exposée d'une manière élémentaire, au moins pour le moment. Il suffit de dire que les points dont nous n'avons pas encore donné d'explication ne sont pas pour cela inexplicables actuellement, mais que les théories ne sont pas assez avancées pour qu'on puisse les faire saisir par de simples modèles mécaniques. Néanmoins, une explication générale et élémentaire de la manière dont le mouvement peut simuler les effets de l'élasticité a été donnée par sir W. Thomson dans l'*Encyclopédie Britannique*, au mot « Élasticité ». Cette explication est basée sur la considération des gyroscopes, et la démonstration de ce fait que l'on peut obtenir les propriétés d'un solide élastique en imprimant un mouvement à un fluide homogène et sans structure est l'une des plus remarquables des découvertes de ce physicien.

Dans tout le cours de la troisième Partie, nous avons été obligé de considérer l'éther comme formé de cellules contenant de l'Électricité en rotation, l'aimantation consistant à orienter ces tourbillons; or, d'après ce que nous venons de dire, il suffit d'imaginer dans un milieu des tourbillons pareils pour qu'il se comporte comme un milieu élastique.

Il nous suffira d'avoir montré cette concordance, et, sans

---

(1) *Brit. Assoc. Report*, 1885, p. 930.

(2) *Ibid.*, 1887, p. 486. *Voir* également *Phil. Mag.*, octobre 1887.

nous étendre davantage sur ce point, nous passons à une autre partie du sujet.

157. Nous avons vu que, pour engendrer une radiation, il suffit d'une oscillation électrique, et nous avons considéré en particulier cette sorte d'oscillation électrique qui se produit dans le circuit d'un condensateur lorsque la distribution électrique est brusquement modifiée, par exemple au moment de la décharge. Mais il n'est pas nécessaire pour cela d'une bouteille de Leyde proprement dite; un cylindre ayant une charge statique accumulée à une extrémité et abandonnée brusquement à elle-même produit cet effet.

Le déplacement de cette charge constitue un véritable courant, quoique d'une faible intensité; une certaine inertie y est associée et, par suite, il se produit des oscillations, la charge passant d'un bout à l'autre du cylindre, comme l'eau dans un vase allongé dont le niveau est soudainement modifié.

En principe, ce phénomène ne diffère pas de la décharge d'un condensateur; les extrémités du cylindre ont une certaine capacité et le cylindre une certaine self-induction; la difficulté du problème consiste à trouver leur valeur dans chaque cas (1). La période d'oscillation sera encore

$$2\pi\sqrt{LC},$$

et comme L et C sont tous deux fort petits, la fréquence des vibrations est extrêmement grande. L'amortissement de ces vibrations dans le cas où il n'y a pas de source continue est aussi très rapide, parce que l'énergie mise en jeu est très faible.

Quand nous avons affaire aux oscillations des charges atomiques, la durée d'oscillation peut être assez courte pour ne plus affecter l'œil. On peut calculer, en effet, que l'oscilla-

(1) Cette difficulté est très réelle; c'est ainsi que dans les expériences de M. Hertz, qui sont une confirmation au moins partielle des vues de l'Auteur, le calcul de la période d'oscillation était affecté d'une double erreur, comme MM. Stefan et Poincaré l'ont fait voir. Ces erreurs portaient à la fois sur la détermination de la capacité et de la self-induction de l'oscillateur électrique.

(*Note du Traducteur.*)

tion d'une charge atomique donne lieu aux rayons ultra-violets. Il est assez probable que c'est parce que ces rayons-là sont synchroniques avec la période de vibration des charges atomiques qu'ils ont une action chimique si puissante.

158. Soit que la charge oscille sur un conducteur fixe, soit que le corps chargé vibre dans son ensemble, il en résulte un courant alternatif, qui donne toujours lieu à une radiation. Or, lorsque nous avons étudié les phénomènes de l'Électrolyse, nous avons été conduit à nous représenter les molécules comme composées de deux atomes ou groupes d'atomes, chargés l'un et l'autre d'une quantité égale des deux Électricités. Sous l'influence de la chaleur, les composantes de la molécule sont mises en vibration, la période du mouvement dépendant de certaines constantes de constitution des molécules, qui caractérisent celles-ci.

Les atomes étant chargés, cette oscillation mécanique est accompagnée d'une oscillation électrique, en sorte qu'une radiation électrique est excitée et se propage de tous côtés.

Parmi ces vibrations, il y en a toute une série dont la durée est suffisante pour affecter la rétine, en sorte que ces atomes constituent indirectement une source nouvelle de lumière. La fréquence ou la période des radiations visibles peut être examinée et déterminée par les procédés optiques (en général, par des expériences d'interférence, par l'emploi de réseaux de diffraction) et, par suite, nous pouvons connaître les divers modes possibles de vibration d'une molécule donnée dans des conditions déterminées, connaissance qui forme la base de la Spectroscopie.

Il est possible que la période très longue de certains rayons phosphorescents provienne du fait que les atomes subissent indirectement un effet de la perturbation éthérique en augmentant ainsi l'inertie du milieu. Il est possible également que l'émission de radiations phosphorescentes définies par quelques substances soit due à des périodes de vibration propres aux atomes, qui, étant soumis indirectement à l'action d'une radiation qu'ils absorbent, la réémettent en en augmentant la période.

159. Afin de mieux nous rendre compte de la manière dont une charge oscillante ou un corps chargé oscillant peuvent propager une radiation, considérons de nouveau la *fig.* 39 et imaginons que la crémaillère ait un mouvement de va-et-vient. Elle donnera lieu à une rotation oscillatoire des roues avec lesquelles elle engrène, mouvement qui se propagera de proche en proche. Si le système était rigide, la propagation serait instantanée ; mais s'il est élastique, la vitesse de propagation dépend de l'élasticité et de la densité, comme nous l'avons vu. La crémaillère détermine la direction de l'oscillation électrique, et les axes des roues, la direction de l'oscillation rotatoire magnétique; celle de la propagation ou de l'avancement des ondes est normale à ces deux directions.

En réalité, notre modèle ne se rapporte pas à l'espace; ce n'est qu'une section, et il ne donne qu'une idée grossière d'un modèle mécanique imitant les phénomènes qui se passent réellement.

Les roues engrenant d'une manière parfaite, entre elles et avec la crémaillère, représentent un isolant ou diélectrique : il n'y a pas de glissements ou de dissipation d'énergie par frottements; en d'autres termes, il n'y a pas de courants électriques proprement dits. L'oscillation électrique est un simple déplacement oscillatoire dû à l'élasticité des roues qui cèdent légèrement, en sorte que, durant chaque période d'accélération, elles sont dans l'état représenté *fig.* 46, tandis que la *fig.* 37 représente l'état d'équilibre du milieu.

Effets produits par la rencontre d'un autre milieu.

160. Considérons maintenant un système d'ondes qui se propagent et tâchons de nous représenter ce qui arrive quand elles rencontrent un obstacle, par exemple un milieu plus dense ou moins élastique, ou tous les deux à la fois. Si le nouveau milieu est un isolant parfait, il faut se représenter que ses roues engrènent parfaitement entre elles et avec celles du premier milieu, en sorte qu'il n'y a ni glissements ni dissipation d'énergie à la surface. Dans ce cas, il n'y a aucune

absorption de la radiation; une partie de celle-ci est réfléchie et l'autre réfractée, suivant les lois ordinaires et bien connues de la Mécanique. L'onde réfractée se propage avec une vitesse moindre, et par suite, si l'incidence est oblique, la propagation s'effectue dans une direction différente. De même, aux extrémités de l'obstacle ou à la limite d'une partie circonscrite artificiellement dans le milieu, il se produit divers effets dus à ce que l'onde s'étend dans certaines parties de ce milieu qui ne sont pas dans le chemin direct.

Ces effets de réfraction et de diffraction sont communs à la propagation de toutes les ondes et tout ce que nous en pourrions dire au sujet de la radiation électrique se retrouve dans les parties correspondantes des traités d'Optique.

161. Il y aurait, par contre, une remarque assez importante à faire sur la grandeur et la direction de la vibration réfléchie, mais je crois qu'il est préférable pour le moment de la laisser de côté, quitte à y revenir.

Si l'engrènement entre le nouveau milieu et l'ancien était imparfait, si, par exemple, il y avait une couche de roues de friction entre les deux, représentant une lame plus ou moins conductrice, il y aurait absorption d'une partie de la radiation à la surface, elle ne serait pas transmise ou réfléchie en entier, et cette couche subirait un léger échauffement. Une couche pareille modifierait profondément les lois de la réflexion.

Radiation électrique rencontrant un conducteur.

162. Considérons maintenant le cas d'un obstacle conducteur c'est-à-dire le cas d'ondes rencontrant un milieu dont les particules électriques sont reliées, non par une liaison élastique, mais par une liaison de frottement. Il est évident que, dans ce cas, non seulement la couche limite de ce milieu, mais chaque couche subséquente doit subir un certain glissement durant chaque période d'accélération, et que, par suite, en pénétrant ainsi dans une épaisseur suffisante d'un milieu plus ou moins conducteur, la radiation incidente doit être ré-

fléchie ou absorbée en entier; rien n'en est transmis au delà.

Reportons-nous à la *fig.* 43, et imaginons que la crémaillère oscille. La perturbation se transmet sans perte par nos pignons, tandis que dans les couches extérieures de la région conductrice ABCD, il y a un certain glissement, et une radiation moins énergique pénètre à la couche suivante EFGH, et ainsi de suite. Sous une certaine épaisseur, une substance conductrice doit nécessairement être imperméable à la radiation électrique : les conducteurs sont opaques.

La conductibilité n'est pas la seule cause de l'opacité, et il ne faudrait pas conclure que tous les corps opaques sont conducteurs. Mais la conductibilité est une cause d'opacité, et il est certain que tous les conducteurs électriques sont nécessairement opaques; il faut bien comprendre que l'épaisseur de la couche d'une substance homogène qui peut être considérée comme parfaitement opaque, doit dépendre de sa conductibilité. C'est une question de dissipation, et l'on peut admettre qu'une faible fraction de la perturbation traverse un obstacle quelconque. Une mince feuille métallique est parfaitement opaque à la lumière, à partir cependant d'une certaine épaisseur ([1]).

163. Lorsque nous disions que la conductibilité n'est pas la seule cause de l'opacité, nous faisions allusion à l'opacité causée par l'hétérogénéité du milieu. Une masse confuse de

---

([1]) On peut se demander quelle est la vitesse de propagation dans les métaux, car la formule fondamentale, n'est pas applicable dans ce cas, la valeur de la constante diélectrique K n'étant pas déterminée.

C'est donc à l'Optique qu'il faut s'adresser; or il résulte des expériences effectuées par M. Kundt sur des prismes métalliques extrêmement minces de divers métaux, que la vitesse de la lumière y est très différente de ce qu'elle est dans l'éther libre. C'est ainsi que ce physicien a trouvé l'indice de réfraction de l'argent égal à 0,27, ce qui indique une vitesse quatre fois plus grande que dans l'air. Pour les autres métaux, la vitesse est d'autant plus grande que la conductibilité électrique est plus élevée. Ces expériences prouveraient donc, dans la théorie de Maxwell, que, sous une faible épaisseur et pour les forces électriques de courtes périodes, les métaux se comportent comme des diélectriques.

La constante K serait, d'après ce qui précède, égale à 0,073 pour l'argent.

(*Note du Traducteur.*)

particules parfaitement transparentes peut être absolument opaque, comme le verre pilé, par exemple.

Ainsi, bien qu'un corps conducteur doive être opaque, l'inverse n'est pas nécessairement juste. Un isolant n'est pas forcément transparent, mais un isolant homogène non crevassé doit être transparent, au moins pour certaines longueurs d'ondes; inversement, un corps homogène, opaque et sans crevasses, s'il est réellement opaque pour les rayons de toutes longueurs d'ondes, doit être conducteur.

Ce rapport très simple entre deux propriétés, qui paraissent être de prime abord aussi distinctes que la conductibilité électrique et la transparence pour la lumière, découle de la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell, et il est possible de calculer l'opacité théorique d'une substance homogène et isotrope donnée en connaissant sa conductibilité électrique spécifique.

164. Pour comprendre ce qui arrive lorsque la radiation rencontre un milieu conducteur, il est plus simple de passer de suite au cas limite et de considérer un conducteur parfait. Dans ce cas, nos roues ne sont même pas reliées par friction, elles n'ont aucune liaison. Par conséquent, le glissement à la surface d'un tel conducteur sera complet, et il n'y aura aucune dissipation de l'énergie. L'espace blanc de la *fig.* 38 représente une couche infiniment conductrice.

Une radiation éthérique rencontrant un conducteur parfait, arrive en fait à la limite du milieu : au delà, il n'y a plus rien qui puisse la propager; la couche extérieure des roues reçoit une impulsion qu'elle ne peut transmettre plus loin, et que, par suite, elle renvoie dans la même direction à celle qui la précède avec une inversion de phase : la radiation est réfléchie en entier. C'est le même phénomène qui se produit lorsque l'onde sonore atteint l'extrémité ouverte d'un tuyau d'orgue, ou lorsqu'elle tend à passer de l'eau dans l'air; c'est encore ce qui se passe dans la dernière d'une série de balles élastiques en contact qui transmettent un choc.

165. Les ondes réfléchies se superposeront aux ondes di-

rectes et interféreront avec elles; si les distances sont bien choisies, nous pourrons obtenir la formation bien connue de nœuds fixes et d'ondes stationnaires.

166. Le point le plus intéressant cependant est qu'un conducteur parfait serait absolument impénétrable à la lumière; ce corps formerait un miroir parfait pour les rayons de toutes les longueurs d'ondes.

Ainsi, avec un conducteur parfait ou un isolant parfait, il n'y a pas de dissipation. Une radiation qui l'atteint est, ou bien réfléchie en entier, ou bien en partie réfléchie et en partie réfractée. Ce n'est que dans le cas de conductibilité imparfaite qu'il y a absorption d'une partie de la radiation: les vibrations éthériques sont transformées en vibrations atomiques, c'est-à-dire en chaleur.

167. La manière dont une radiation ou toute autre perturbation électrique diffuse avec une perte continuelle à travers un conducteur imparfait peut se comprendre à l'inspection de la *fig.* 43. Les lignes consécutives de glissement ABCD, EFGH, etc., constituent successivement des couches de courants induits.

Une impulsion électromotrice se détruit d'elle-même par la production de ces courants qui pénètrent dans des couches de plus en plus profondes suivant les lois de la diffusion.

Si l'onde a rencontré la surface d'une couche très mince, une certaine fraction de la radiation passera de l'autre côté; c'est-à-dire que l'amplitude sera réduite suivant une loi logarithmique ou suivant une progression géométrique, en fonction de l'épaisseur de la couche.

CHAPITRE XV.

INFLUENCE DES EFFETS ÉLECTROSTATIQUES ET ÉLECTROMAGNÉTIQUES SUR LA LUMIÈRE.

168. Nous devons mentionner maintenant quelques phénomènes qui dépendent entièrement d'une modification de l'éther produite par la présence de la matière pondérable, et qui, selon toutes apparences, n'auraient pas lieu dans l'éther libre. Ce sont les phénomènes optiques de Faraday et de Kerr, et le phénomène électrique de Hall.

Faraday a découvert bien avant qu'il ne fût question d'aucune autre relation entre la lumière et l'Électricité, que le plan dans lequel s'effectuent les vibrations lumineuses peut être dévié lorsque la lumière est transmise dans le sens des lignes de force au travers de certains corps. Pour rendre cet effet bien visible, on emploie de la lumière polarisée dans un plan et on lui fait traverser une certaine longueur de la substance aimantée; on l'analyse à sa sortie, et l'on trouve que, bien qu'elle soit encore polarisée dans un plan, ce plan a tourné d'un angle plus ou moins grand.

Il paraît facile d'imaginer que, puisqu'il se produit dans le champ magnétique quelque chose d'analogue à une rotation autour des lignes de force, des vibrations transmises dans un milieu pareil le long de ces lignes seront déplacées autour de celles-ci, et émergeront dans un plan différent.

Mais, lorsqu'on essaie de suivre ce phénomène dans ses

détails, on trouve que la chose est plus compliquée. Il est certain que cet effet n'est pas une simple conséquence de l'existence d'une rotation magnétique autour des rayons lumineux, car, sans cela, il aurait lieu également dans le vide et serait de même sens dans tous les milieux.

Or, en fait, il n'a pas lieu dans l'espace libre, ou l'éther libre, et le sens varie suivant les milieux.

169. Les mêmes remarques peuvent être faites au sujet de l'effet électro-optique découvert par le Dr Kerr, qui a montré que la lumière polarisée dans un plan et transmise dans la direction des lignes de force d'un champ électrostatique peut, dans certains milieux, émerger sous forme de lumière polarisée elliptiquement. Or, comme un champ électrostatique donne lieu à des tensions intérieures, et que des tensions peuvent rendre légèrement biréfringent un corps transparent et par suite donner lieu à la polarisation elliptique, on pourrait croire que le fait observé n'est que la conséquence naturelle de cette propriété.

Ici encore l'explication n'est pas aussi simple, autrement nous aurions une loi générale, l'effet serait de même sens dans tous les corps et aurait lieu également dans le vide, ce qui n'est pas le cas.

Ainsi donc, la rotation électromagnétique du plan de polarisation découverte par Faraday, et la double réfraction produite par un champ électrostatique, reconnue par Kerr, ont ceci de commun que ce sont tous deux des effets résiduels et très petits qui dépendent de la présence d'un milieu dense, et dont le sens varie suivant la nature de ce milieu.

170. Le fer, le cobalt et le nickel sont les seules substances dans lesquelles l'effet de Faraday soit considérable. Cette découverte est due également à Kerr. La difficulté qu'il y avait à le reconnaître tient naturellement à ce que ces corps sont opaques, et qu'il fallait expérimenter sur des couches extrêmement minces. On peut réaliser celles-ci soit par voie de transmission, soit par voie de réflexion, et c'est sous cette

forme que l'expérience a été effectuée en premier lieu ([1]).

La lumière réfléchie à la surface d'un aimant ne pénètre dans le métal qu'à une profondeur infiniment faible, néanmoins elle y pénètre assez profondément pour que le plan de polarisation soit sensiblement tourné par les puissants tourbillons magnétiques que la lumière y rencontre.

171. Tous les corps fortement magnétiques sont de bons conducteurs et sont, par suite, opaques.

Nous ne pouvons dire s'il y a une relation entre une susceptibilité magnétique élevée et une haute conductibilité, mais il est naturel et même nécessaire que la plus grande partie de la lumière soit réfléchie en pénétrant dans un milieu fortement magnétique, parce que la densité éthérique μ étant considérable, la vitesse de transmission doit subir une énorme et brusque diminution, ce qui donne toujours lieu à une forte réflexion, comme lorsque le son tend à passer d'un milieu dans un autre milieu beaucoup plus dense.

Mais l'opacité du fer et des autres corps magnétiques peut être expliquée par le seul fait de leur pouvoir conducteur, comme pour tous les métaux, et aucun effet optique remarquable ne résulte de leur perméabilité magnétique spéciale.

S'il existait une substance fortement magnétique non conductrice, elle donnerait lieu probablement à une forte réflexion de la lumière à sa surface, mais sans absorption de la lumière transmise. Un corps pareil serait des plus intéressants à étudier, mais il se peut que ces deux conditions soient incompatibles; en tout cas, on ne connaît aucun corps semblable.

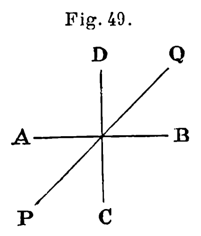
172. On peut expliquer comme suit, d'une manière générale, ce qui se passe dans les phénomènes de Faraday et de Kerr :

([1]) Les expériences directes par voie de transmission ont été effectuées par M. Kundt qui a trouvé que dans le fer, le nickel et le cobalt, la rotation est proportionnelle à l'intensité d'aimantation. Cette rotation tend donc vers une limite qui serait de 200000° par centimètre de longueur pour le fer. (*Note du Traducteur.*)

Une vibration simple, comme l'oscillation pendulaire ou toute autre oscillation plane, peut être résolue d'une infinité de manières en deux composantes, comme une force peut être décomposée en deux autres forces équivalentes d'une infinité de manières.

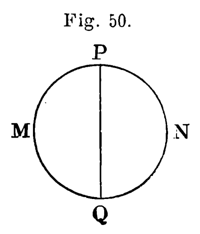
Les deux modes les plus remarquables de décomposition

Fig. 49.



consistent, l'un à décomposer en deux vibrations planes identiques AB, CD, inclinées à 45° sur la vibration donnée PQ (*fig.* 49), l'autre à décomposer celle-ci en deux vibrations circulaires, identiques, mais de sens opposé PMQ et PQM

Fig. 50.



(*fig.* 50). On se servira du premier pour expliquer l'effet Kerr, et du second pour expliquer l'effet Faraday.

Si, pour une cause ou pour une autre, l'une des deux composantes AB et CD est animée d'une vitesse de propagation un peu plus considérable, on obtient une modification de la vibration résultante. Celle-ci n'est plus une vibration plane, mais une vibration elliptique ou même circulaire, dans le cas où le retard de l'une des vibrations simples composantes est égal à un quart de la période.

De même, d'après le second mode de représentation, si le

mouvement a lieu dans un milieu pour lequel la vitesse des deux vibrations circulaires est identique, elles reproduisent à la sortie la vibration originelle dans le même plan; mais si l'une traverse avec une vitesse plus grande, elles donnent bien lieu encore en se recombinant à une vibration plane, mais dont le plan a tourné d'un certain angle.

Ainsi, toute cause qui retarde l'une des composantes *rectangulaires* modifie le caractère de la vibration qui, de plane, devient elliptique; tandis qu'une cause qui retarde une des vibrations *circulaires* composantes ne modifie pas la nature du mouvement, mais fait tourner le plan de vibration d'un certain angle.

173. Jusqu'ici, ce ne sont que de simples considérations mécaniques, et il faut chercher ce qui peut modifier la vitesse de propagation de la lumière dans un milieu. Comme nous l'avons déjà vu, cette vitesse est égale à $\frac{1}{\sqrt{K\mu}}$. Par suite, toute cause qui augmente la perméabilité magnétique ou diélectrique du milieu diminue la vitesse de la lumière.

Or, quand un milieu est déjà soumis à une tension considérable dans une direction, il peut se faire que son élasticité se modifie. A vrai dire, il n'en est pas toujours ainsi, et, pour cela, il faut que la tension soit excessive, et qu'il commence à y avoir déformation permanente.

On a de bonnes raisons de croire que la capacité inductive spécifique d'un grand nombre de corps est constante, à très peu près, et qu'elle l'est même rigoureusement pour certains milieux; néanmoins, puisqu'il y a une tension limite que l'on ne peut dépasser, il est très probable que, pour des valeurs voisines, la capacité inductive spécifique doit varier, sans qu'on puisse prévoir dans quel sens.

M. Quincke a en effet montré que la valeur de K est modifiée par l'action d'une forte tension électrique.

Supposons maintenant qu'un diélectrique soit soumis à une violente tension électrique, en sorte que ses propriétés dans la direction des lignes de force deviennent légèrement diffé-

rentes de ce qu'elles sont suivant toute droite perpendiculaire; la valeur de K ne sera plus la même dans ces deux directions et, par suite, la composante dans le sens des lignes de force se propagera avec une vitesse différente de celle de la composante normale à celles-ci, puisque la vitesse de transmission dépend de K, comme nous l'avons déjà dit : Un milieu pareil devient anisotrope et présente les propriétés biréfringentes nécessaires pour expliquer l'effet Kerr.

174. Une explication semblable s'applique au cas du phénomène électromagnétique de Faraday. Comme on le sait, la perméabilité μ est loin d'être constante pour divers corps. Dans le fer, par exemple, la perméabilité est faible pour de très petites forces, et elle augmente avec celles-ci; pour une certaine valeur de l'aimantation elle atteint un maximum pour décroître ensuite progressivement. Cette quantité est donc essentiellement variable, en outre, sa valeur est différente suivant que l'aimantation augmente ou diminue; en général, elle est plus petite pour une force donnée lorsque l'aimantation est décroissante.

Cette propriété doit exister dans tout corps qui présente l'effet du Magnétisme rémanent, et, d'après nos expériences, tous les corps essayés en ont présenté des traces.

Un corps qui est déjà aimanté fortement présente donc une susceptibilité magnétique moindre pour les forces qui agissent dans le même sens que pour les forces opposées. Or, cela suffit pour expliquer l'effet Faraday.

Concevons que notre vibration soit résolue en ses deux composantes circulaires; l'une d'elles sera de même sens que les courants moléculaires, causes de l'aimantation du milieu, et tendra à l'aimanter davantage; l'autre, au contraire, agira en sens inverse. Les valeurs de μ correspondant à ces deux actions seront différentes; les vitesses de transmission seront également différentes et le plan de vibration (polarisation) tournera (1).

---

(1) Je dois avouer que je n'attache pas un grand poids à cette relation entre l'hystérésis et la rotation du plan de polarisation, car, ainsi que me l'a fait remarquer le professeur Fitzgerald, cette théorie ne s'applique

175. La rotation aura lieu dans un sens ou dans un autre, suivant que la valeur de μ est plus grande pour une petite diminution de la force magnétique que pour une faible augmentation; dans le cas des corps diamagnétiques, on doit s'attendre à ce que l'inverse ait lieu.

Si un corps a une perméabilité μ absolument constante, quelle que soit l'intensité du champ auquel il est soumis, il n'y a pas d'hystérésis; les courbes ascendantes et descendantes d'aimantation coïncident, en se réduisant à une même ligne droite, et un corps pareil ne peut présenter l'effet de Faraday.

De même, un corps à capacité inductive K constante ne donnera pas lieu à l'effet Kerr. L'espace libre ou le vide paraît être dans ce cas et les gaz s'en rapprochent.

Dans le fer, μ est plus grand pour les forces croissantes que pour les forces décroissantes, comme le montrent les boucles du cycle d'aimantation; par suite, la composante circulaire dont le sens concorde avec celui du courant magnétisant, se transmet plus lentement que l'autre, et par suite aussi, la rotation dans le fer doit être en sens inverse du courant magnétisant ([1]).

Le même cas semble avoir lieu également dans la plupart des corps magnétiques, et l'inverse dans les corps diamagnétiques; mais le fait du paramagnétisme et du diamagnétisme ne suffit pas pour indiquer le sens de cet effet. Nous devons connaître la manière dont la perméabilité est affectée par les variations de la force magnétique.

---

guère lorsqu'on considère l'onde complète; il vaudrait mieux faire intervenir directement la perturbation électromagnétique que de faire appel à un effet magnétique secondaire du déplacement électromagnétique. En outre, le professeur Ewing doute qu'il soit légitime, dans ce cas, d'effectuer la décomposition cinématique du déplacement en deux composantes circulaires. Néanmoins, comme il peut y avoir quelques traces de vérité dans cette idée, je conserve ce paragraphe pour le moment, tout en faisant mes réserves à ce sujet.

(*Note de l'Auteur.*)

([1]) L'hypothèse faite par l'Auteur ne semble pas être confirmée par l'expérience, car les recherches de M. Kundt dont nous parlions ci-dessus ont montré que, dans les métaux magnétiques, la rotation a lieu dans le sens du courant magnétisant.

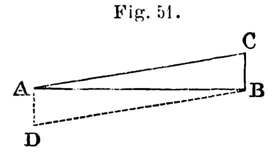
(*Note du Traducteur.*)

Expérience électrostatique permettant de reconnaître l'effet Faraday.

176. Jusqu'ici, nous avons supposé que l'on étudiait par des procédés optiques la rotation du déplacement électrique, ce déplacement correspondant aux vibrations lumineuses et la rotation étant déterminée au moyen d'un polariseur et d'un analyseur qui permettent de reconnaître le plan dans lequel ont lieu les vibrations, avant et après le passage du rayon à travers un corps soumis à l'action d'un champ magnétique. C'est la seule manière dont cet effet a pu jusqu'ici être observé dans les corps transparents. Mais nous ne sommes pas limités à cette méthode optique. Des déplacements électriques sont faciles à produire dans un corps isolant, et si ce dernier est soumis à un champ magnétique intense, et tel que les lignes de forces magnétiques et électriques soient à angle droit, on doit s'attendre à voir tout déplacement électrique subir une légère rotation.

Une tension électrostatique permanente et constante ne peut subir aucun effet, ce n'est que pendant l'état variable qu'il doit se produire, comme dans le cas de la lumière. Or, pour que le déplacement AB tourne en AC (*fig.* 51), il faut qu'il se

Fig. 51.



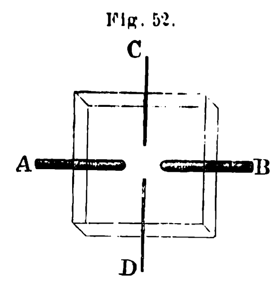
produise un déplacement normal BC; par suite, l'effet du champ magnétique sur un déplacement AB peut se ramener à la production d'une légère force électromotrice perpendiculaire à la direction du déplacement et qui, en se combinant avec la force électromotrice provenant de la perturbation électromagnétique, donne le déplacement résultant AC.

C'est un effet temporaire qui ne dure que pendant que le déplacement électrique s'effectue et qui cesse dès que le milieu prend un état de tension permanente. Une force électromotrice

de sens inverse sera excitée par le même champ magnétique dès que la direction du déplacement sera renversée. Par suite, si une oscillation électrique est entretenue continuellement entre les points A et B dans un champ magnétique, on doit s'attendre à pouvoir observer une légère oscillation électrique transversale.

On pourrait faire usage pour cela de quelque dispositif semblable à celui de la *fig.* 52 et qui consiste en un bloc de flint

Fig. 52.



Production d'une f. e. m. transversale dans un diélectrique soumis à un déplacement électrique variable dans un champ magnétique.

percé de quatre trous dans lesquels sont disposées quatre électrodes; une paire AB serait reliée à une source électrique alternative quelconque et l'autre paire à un téléphone ou à tout autre indicateur de faibles perturbations électriques. En faisant agir un champ magnétique intense, on pourrait peut-être observer au téléphone un léger bruit provenant des oscillations transversales. Cet effet n'a pas encore été observé expérimentalement, mais il me semble être une conséquence nécessaire de la rotation électromagnétique du plan de polarisation découverte par Faraday.

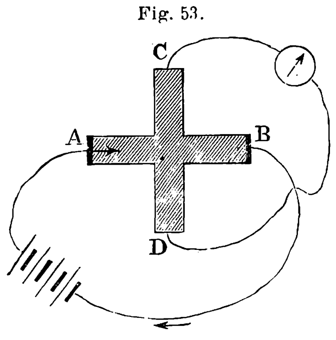
Phénomène de Hall.

177. Bien que l'existence de cette force électromotrice transversale produite par un champ magnétique sur un déplacement électrique variable n'ait encore été observée que par la méthode optique dans les corps transparents, c'est-à-dire dans les isolants, l'effet correspondant produit par un courant constant dans

les corps conducteurs a été observé électriquement. Soupçonné par plusieurs personnes (entre autres par le professeur Carey Foster et l'Auteur), il fut signalé pour la première fois par M. Hall, de Baltimore.

Dans les conducteurs, il est naturel d'employer un courant de conduction, au lieu d'un courant de déplacement. Un courant constant étant maintenu entre les électrodes A, B dans un carré ou une croix en or ou en tout autre métal sous une

Fig. 53.



Effet Hall : dans le champ magnétique terrestre (composante verticale), la force électromotrice transversale a lieu dans le sens CD pour l'or et DC pour le fer.

épaisseur minime, on peut observer une faible force électromotrice transversale qui donne lieu à un courant constant à travers un galvanomètre relié aux électrodes C, D, dès qu'on fait agir un champ magnétique intense. La *fig.* 53 indique cette disposition expérimentale. Les pôles de l'aimant sont supposés au-dessus et au-dessous de la feuille de papier.

Dans le cas du fer, il est facile de prévoir le sens de cette force électromotrice transverse. On a montré qu'un déplacement sera dévié en sens inverse du courant magnétisant; par suite, pour amener le déplacement AB en AC (*fig.* 51), il faut faire agir un courant magnétisant positif (suivant le sens de la rotation des aiguilles d'une montre). Un courant semblable ou, ce qui revient au même, l'action d'un pôle nord au-dessus du papier et d'un pôle sud au-dessous donne lieu dans la croix de la *fig.* 53 à une force électromotrice dans le sens DC, qui est précisément celui dans lequel, d'après la règle d'Ampère,

le champ tend à entraîner le conducteur parcouru par le courant AB. La plupart des corps diamagnétiques donnent lieu à une force électromotrice de sens inverse.

Cette force électromotrice transverse, engendrée dans un conducteur parcouru par un courant sous l'action d'un champ magnétique, constitue le phénomène de Hall. Il est, comme l'ont fait remarquer le professeur Rowland et d'autres, intimement relié avec le phénomène de la rotation électromagnétique de la lumière découvert par Faraday.

178. Malheureusement, l'effet Hall pur et simple est difficile à observer. Le Magnétisme affecte la conductibilité des métaux d'une manière assez compliquée et des tensions modifient leurs propriétés thermo-électriques. Or un conducteur métallique parcouru par un courant dans un champ magnétique est certainement soumis à des tensions mécaniques plus ou moins fortes et, par suite, de la chaleur est produite inégalement aux divers points par une sorte d'effet Peltier; il en résulte une modification de la résistance dans les diverses directions produisant une perturbation des lignes de flux, comme le ferait une force électromotrice transversale, ainsi que l'a montré M. Shelford Bidwell.

L'effet direct du Magnétisme sur la conductibilité électrique peut être négligeable dans la plupart des métaux, mais dans le bismuth il est considérable. Les deux effets secondaires peuvent donc masquer le véritable effet Hall dans le bismuth et, dans tous les cas, rendre incertains la valeur et même le sens de l'effet rotatoire réel.

179. Mais on pourrait se demander de quel droit nous distinguons ainsi un effet Hall réel et un effet secondaire? Si une force électromotrice transversale peut être engendrée par l'effet de tensions connues et des propriétés thermo-électriques aussi bien que par la cause du phénomène de rotation électromagnétique de la lumière, avons-nous le droit de distinguer entre les deux faits? Ne sont-ce pas seulement deux aspects d'un seul et même phénomène? En d'autres termes, la rotation électromagnétique de la lumière ne peut-elle être causée

par des tensions temporaires et par des échauffements du milieu dus à ce fait que de faibles déplacements électriques se produisent dans un champ magnétique intense? Cette question pourra être résolue par une détermination quantitative des effets à observer dans cette hypothèse et de leur sens, et par comparaison avec les résultats d'expériences. Mais les données actuelles ne sont pas suffisantes pour vérifier cette hypothèse qui relierait ainsi plusieurs phénomènes qui paraissent indépendants.

Origine possible des phénomènes de Hall et de Faraday.

180. L'explication que nous venons de donner de la rotation électromagnétique de la lumière fait dépendre ce phénomène de l'existence de l'hystérésis par la série de raisonnements suivants :

La valeur de μ est différente pour les forces croissantes et décroissantes; un déplacement électrique tel que ceux qui ont lieu pendant chaque période simple d'une vibration lumineuse est résoluble en deux composantes circulaires, dont l'une augmente tandis que l'autre diminue toute aimantation déjà induite dans le milieu suivant la direction des rayons. Or la valeur de μ affecte la vitesse de transmission de la lumière, dont les deux composantes circulaires ne se propagent plus avec la même vitesse, et la direction de vibration tourne d'un angle infiniment petit. La même chose se reproduit à chaque oscillation; les rotations élémentaires étant de même sens, on pourrait expliquer ainsi la rotation du plan de polarisation observée.

L'effet Hall dans les conducteurs s'en déduit de suite, puisque la rotation d'un déplacement équivaut à sa combinaison avec un petit déplacement transversal; c'est cette force électromotrice transversale, produite par le champ magnétique, que Hall a découverte. Mais il y a, d'un autre côté, certaines raisons qui militent contre cette explication du phénomène de Hall, et surtout le fait singulier que le nickel fait tourner le plan

de polarisation dans un sens et le déplacement électrique dans l'autre. Jusque dans ces derniers temps, on pouvait espérer mettre cette anomalie sur le compte des *impuretés* du métal; mais, depuis, les deux expériences ayant été effectuées sur le même échantillon, on ne peut plus recourir à cet échappatoire et, pour autant que je sache, la relation entre la rotation du plan de polarisation et l'effet Hall reste indéterminée.

181. Il convient de faire ici encore toutes nos réserves sur la valeur de cette explication de la rotation électromagnétique et de l'effet Hall. Si elle était correcte, elle aurait pour résultat de relier ces phénomènes à celui de l'hystérésis, et la direction de l'effet observé dans le fer est bien celle qu'on déduirait de cette manière de voir : la rotation a lieu en sens inverse du courant magnétisant.

Le professeur Ewing m'a fait remarquer depuis que d'après ses dernières études sur l'aimantation du fer, la différence observée dans les valeurs de μ pour des forces positives ou négatives n'a lieu que pour un certain nombre de cycles, pendant que l'on s'approche de l'état final, et ne persiste pas lorsqu'un état stable a été atteint. Le phénomène de la rotation magnétique serait ainsi fonction du temps; or certaines expériences effectuées par Villari sur un disque de verre tournant entre les pôles d'un électro-aimant, de manière à amener toujours de nouvelles particules dans le champ, ont indiqué une diminution marquée de la rotation, dès qu'on réalisait de très grandes vitesses. Ceci semblerait prouver qu'un certain temps est nécessaire pour produire cet effet, mais ces expériences demandent à être reprises.

182. Une autre explication qui semble indépendante de celle qui précède peut également être donnée de la rotation électromagnétique, explication qui rattacherait ce phénomène aux propriétés thermo-électriques.

Pour expliquer l'effet Thomson dans les métaux, on a proposé d'admettre qu'entre l'une des Électricités et une matière déterminée, il existe une sorte de lien qui est différent de celui qui existerait entre la même matière et l'autre Électricité. Ainsi

les atomes de fer auraient une liaison plus forte avec l'Électricité positive qu'avec la négative, tandis que l'inverse a lieu pour le cuivre. Tous les métaux peuvent être rangés dans l'une ou l'autre des deux classes, à l'exception du plomb qui paraît neutre à ce point de vue. C'est le même fait qui est exprimé par les *chaleurs spécifiques de l'Électricité* de Thomson.

Il est certain, en tout cas, que les atomes de fer en vibration (échauffés) déplacent l'Électricité positive des points où les vibrations sont plus rapides à ceux où elles sont plus lentes, c'est-à-dire des points chauds aux points froids, tandis que l'inverse a lieu dans le cas du cuivre.

Il nous semble qu'on peut se représenter cet effet comme une conséquence directe de la loi d'Ohm, combinée avec une certaine relation entre les diverses sortes de matière et les deux Électricités, relation qui peut se manifester d'une autre manière; par exemple, nous aurons une explication possible quoique hasardée du phénomène de Faraday en supposant que les courants moléculaires d'Ampère ne consistent plus, dans les corps qui présentent cette propriété, en deux courants positif et négatif égaux, mais en deux courants légèrement différents.

Supposons, par exemple, que la densité de la partie positive de l'éther qui reste liée au corps soit un peu plus grande que celle de la partie négative, en sorte que l'éther entraîné d'une molécule aimantée soit animé d'une légère rotation dont la vitesse est égale à la résultante des mouvements des parties constituantes. Par exemple, dans le fer, le courant d'Ampère positif serait le plus faible, en sorte que l'éther, pris dans son ensemble, serait en rotation dans le sens du courant négatif; par suite, une vibration circulaire pénétrant dans ce milieu serait entraînée dans le sens inverse du courant magnétisant; dans le cuivre, la rotation aurait lieu en sens contraire.

183. D'après cette manière de voir (assez confuse assurément), le plomb ne devrait présenter aucun effet rotatoire, et par suite aucun effet Hall. En outre, les corps seraient rangés dans la même classe relativement au signe, soit pour l'effet Hall, soit pour l'effet Thomson.

Hall a trouvé que, parmi les métaux étudiés, le fer, le cobalt et le zinc sont dans une même classe, tandis que l'or, l'argent, l'étain, le cuivre, le laiton, le platine, le nickel, l'aluminium et le magnésium sont dans la classe opposée. Or, d'après Tait, nous trouvons que pour le fer, le cobalt, le platine et le magnésium, le coefficient de l'effet Thomson est affecté du signe négatif, tandis que pour l'argent, l'étain, le cuivre, l'aluminium et le zinc, le coefficient est positif.

Il y aurait donc discordance pour le zinc, le platine et le magnésium. Il est d'usage en pareil cas de faire appel à l'impureté des échantillons, et certainement il en était ainsi ; néanmoins, nous n'avons pas le courage d'invoquer cet argument commode en faveur de cette théorie.

D'après des mesures publiées en 1885 par M. Hall, l'effet qui porte son nom serait énorme dans le bismuth et de même sens que dans le cuivre, tandis que dans l'antimoine, où il est également considérable, il est de même sens que dans le fer.

Il semblerait donc cependant y avoir quelque relation entre cet effet et les propriétés thermo-électriques, mais la nature exacte en est encore à déterminer.

Autres problèmes qui se posent.

184. Dans l'état actuel de nos connaissances, les problèmes se posent de tous côtés ; et si j'en choisis quelques-uns parmi eux, c'est parce que j'ai été conduit moi-même à faire quelques expériences dans ces directions-là, ou parce qu'ils ont attiré tout spécialement mon attention, sans que j'aie eu l'occasion d'en parler dans le corps de cet Ouvrage.

Nous reportant à la fin de la deuxième Partie : *Le courant considéré comme une charge en mouvement*, il est naturel de se demander si ce mouvement doit être absolu ou relatif à l'éther seulement, ou encore au magnétomètre qui décèle l'existence des courants ? En d'autres termes, si un corps chargé et une aiguille magnétique se déplacent simultanément dans l'espace, par exemple en raison du mouvement orbital de la Terre, l'aiguille subira-t-elle une déviation ? C'est là un des

nombreux problèmes qui se rapportent à l'éther et à son mouvement par rapport à la matière pondérable, problèmes obscurs sur lesquels l'expérience de Fizeau, montrant qu'une partie de l'éther est liée aux corps et se déplace avec eux, tandis que le reste est libre et se déplace au travers, a jeté quelque lumière. C'est une question du même genre que l'on rencontre dans les problèmes de l'aberration qui ont été partiellement résolus par les travaux de Stokes, et dans ceux qui se rapportent aux mouvements de l'éther en présence de grandes masses de matière pondérable, étudiés expérimentalement par Michelson. C'est parmi ces problèmes que nous devons probablement ranger la question de savoir si c'est le mouvement absolu ou relatif des charges électriques qui produit le champ magnétique, et ce que signifie au fond le mouvement absolu dans l'éther. C'est sans doute une question qu'il est possible d'étudier expérimentalement, bien que l'expérience soit malaisée à effectuer.

185. En nous reportant aux trois premières Parties, nous voyons que la question de la force vive du courant est restée définitivement ouverte. Le courant a-t-il une force vive que l'on puisse reconnaître par des procédés mécaniques? Avant de répondre négativement, il conviendrait d'attaquer le problème sous toutes ses faces et de poser les questions suivantes :

1° État permanent; un électro-aimant possède-t-il des propriétés semblables à celles d'un gyroscope?

2° État variable; y a-t-il un faible choc mécanique dans un conducteur lorsqu'un courant s'établit ou cesse?

Ces deux points devraient être étudiés dans les quatre cas suivants :

(*a*) dans les conducteurs métalliques;

(*b*) dans les électrolytes;

(*c*) dans les gaz (convection);

(*d*) dans les diélectriques (déplacement).

A supposer que la question soit résolue négativement dans le cas des métaux, il n'en suit nullement qu'il en doive être de même dans les électrolytes. En fait, comme dans ce dernier cas la matière se déplace avec le courant, il paraît diffi-

cile qu'il n'y ait pas une certaine force vive, quoiqu'elle puisse être trop faible pour être observée; on pourrait avoir soit un choc sur l'auge entière au moment des variations du courant, soit un choc continu contre une des électrodes.

L'Auteur a recherché l'existence de ces effets, mais, après avoir éliminé divers phénomènes secondaires, le résultat a été négatif. Dans le cas d'un petit tube fixé à l'extrémité d'une balance de torsion, la déviation principale était causée par les variations de température qui produisaient graduellement une petite bulle d'air dont le déplacement en avant et en arrière donnait lieu à la même action que l'effet recherché. Avec des électrodes suspendues, les courants produits dans le liquide par des variations de densité masquaient tout autre effet.

Une cause de perturbation dans toutes ces expériences est l'action du Magnétisme terrestre qu'on évitait en disposant, autant que possible, les circuits avec une surface résultante nulle, et en opérant à l'intérieur de la cage de fer du galvanomètre marin de Thomson.

Les expériences de M. Crookes sur le radiomètre, et même peut-être le vieux tourniquet électrique, montrent que dans les gaz il y a certainement une force vive propre au courant.

Pour rechercher si le même effet accompagne les variations du déplacement électrique dans les diélectriques, l'Auteur a suspendu un condensateur en mica à l'extrémité des bras d'une balance de torsion, et disposé les communications de manière à opérer la charge et la décharge dans cette position. On a observé plusieurs phénomènes perturbateurs, mais pas d'effet certain dans la direction cherchée; ce sujet est du reste loin d'avoir été épuisé, et l'Auteur ne mentionne ici ses essais que comme une indication pour d'autres expérimentateurs.

186. Il conviendrait également d'approfondir la question de l'influence de la lumière sur la conductibilité. Le sélénium recuit et peut-être quelques autres corps subissent une énorme augmentation de conductibilité lorsqu'ils sont éclairés. La cause en est inconnue et la question de savoir si c'est une propriété générale propre aux métaux et à d'autres corps n'est pas résolue

les expériences de Boernstein qui concluaient à l'affirmative ayant été vivement critiquées.

Mais si les métaux ne le présentent pas, les électrolytes pourraient bien en être affectés; cet effet, s'il existe, est particulièrement difficile à distinguer de l'effet direct produit par l'absorption des rayons calorifiques.

C'est ainsi que l'Auteur a trouvé que la simple lumière diffuse produisait un effet marqué sur la conductibilité d'une éprouvette de verre plongée dans l'eau bouillante; mais le même effet aurait pu être produit par un échauffement d'un dixième de degré, et une action de cet ordre s'observe facilement dans les mêmes conditions avec un thermomètre.

187. Le fait que les rayons ultra-violets ont une période de vibration synchrone avec les oscillations électriques qui existent probablement dans les molécules, semble appeler une foule de conséquences dont on vient de découvrir quelques-unes.

Hertz a montré en premier lieu que la lumière d'une étincelle électrique exerce une influence à distance sur une seconde étincelle, en sorte que la distance explosive est virtuellement moindre lorsque les électrodes sont illuminées. Wiedemann et Ebert, qui ont poursuivi ces recherches et obtenu des résultats intéressants, ont montré que c'étaient bien les rayons ultra-violets qui étaient actifs. Hallwachs a découvert qu'une plaque métallique s'électrise lorsqu'on l'éclaire. Tous ces effets moléculaires de la lumière semblent dépendre d'une perturbation synchronique produite dans la couche gazeuse au contact immédiat des corps, perturbation dont le résultat est une sorte d'action chimique; en sorte que ces effets physiques sont dus à la même cause qu'un grand nombre d'autres depuis longtemps reconnus mais mal déterminés, et rapportés au pouvoir chimique ou actinique de la lumière.

188. Il y a quelques mois, l'un des problèmes qui se posaient en première ligne était la production d'ondes électriques d'une faible longueur d'onde, leur réflexion, leur réfraction, leurs interférences, leur polarisation et l'action du champ magnétique sur ce plan de polarisation, etc., etc.; en un mot, la répé-

tition des expériences d'Optique. Une grande partie de ces recherches ont été effectuées aujourd'hui, et il n'y a plus lieu d'en parler à cette place.

Conclusion.

Toute *conclusion* dans l'état actuel de la Science serait déplacée, alors que son domaine est renouvelé et que chaque mois semble devoir apporter quelque point de vue nouveau ou affirmer une vérité entrevue seulement jusque-là.

La seule conclusion d'un livre sur l'Électricité consiste à signaler les recherches les plus récentes et à préparer le lecteur à de nouvelles découvertes.

189. Dans tout le cours de la quatrième Partie, nous avons parlé d'une radiation excitée par des oscillations électriques, radiation dont la vitesse est celle de la lumière, qui est réfléchie et réfractée suivant les mêmes lois, et qui en fait est identique aux rayons capables d'affecter notre rétine, si ce n'est en ce qui concerne la longueur d'onde.

Une radiation pareille a été définitivement produite et observée par le Dr Hertz, de Carlsruhe, et, dans les derniers mois de 1888, le Professeur von Helmholtz communiquait à la Société de Physique de Berlin un résumé des dernières recherches de M. Hertz. C'est l'invention d'un appareil récepteur approprié qui lui a permis d'obtenir des résultats cherchés en vain depuis longtemps par d'autres.

La lumière, lorsqu'elle tombe sur un conducteur, y excite d'abord des courants électriques et subsidiairement de la chaleur. C'est cet effet secondaire que nous aurions pensé devoir rechercher, mais M. Hertz a courageusement abordé la difficulté, en recherchant l'effet électrique direct et a trouvé qu'il se manifestait, dans des conditions données, sous la simple forme d'étincelles microscopiques.

Il prend un cylindre de laiton, de quelques centimètres de diamètre et d'environ trente centimètres de long, divisé en deux parties séparées par un léger intervalle, et reliées aux bornes d'une petite bobine d'induction. Chaque étincelle pro-

duit dans la charge du cylindre des oscillations dont le nombre peut atteindre jusqu'à cinq cent millions par seconde et qui causent une perturbation de l'éther équivalant à l'effet d'un faisceau divergent de lumière polarisée dont la longueur d'onde est environ le double de celle du cylindre.

Le rayonnement ainsi produit peut être réfléchi par des surfaces planes conductrices; il peut aussi être concentré par des miroirs paraboliques en métal, lorsque l'oscillateur est placé dans la ligne focale. Dans ce cas, l'effet des ondes se fait sentir à une distance considérable sur un récepteur consistant en un conducteur synchronique muni également d'un micromètre à étincelles. En employant un second miroir semblable au premier pour recevoir les rayons et les concentrer en un foyer, on a pu apprécier l'effet des ondes jusqu'à 20 mètres.

Si le miroir récepteur est tourné à angle droit, il ne concentre plus ces rayons. Au moyen d'ouvertures disposées dans une série d'écrans métalliques interposés sur le chemin des rayons, on montre qu'ils se propagent en ligne droite.

Un grillage en fils métalliques est transparent pour ces ondes lorsque les fils sont disposés normalement aux oscillations électriques, mais il agit comme surface réfléchissante, lorsqu'on le tourne à 90°, de manière à ce que les oscillations aient lieu dans le sens de la longueur des fils. On réalise ainsi une sorte d'analyseur démontrant l'existence de rayons polarisés. L'appareil récepteur dont nous avons parlé agit également comme analyseur, car, si on le fait tourner d'un certain angle, il n'y a plus d'étincelles.

Des feuilles métalliques, même minces, sont très opaques au rayonnement électrique, mais des obstacles non conducteurs, même du bois humide, ne l'affectent que fort peu et ce n'est pas sans étonnement que le Dr Hertz a remarqué qu'une porte séparant l'oscillateur du récepteur pouvait être fermée sans interrompre la communication; on observait toujours les étincelles secondaires.

Mais l'expérience la plus décisive qui ait encore été effectuée est celle de la réfraction.

Un grand prisme d'asphalte avec des faces de plus d'un mètre carré et un angle de 30° environ fut disposé sur le pas-

sage des rayons électriques qui cessèrent d'affecter le récepteur, au moins dans sa position primitive. En l'ajustant de manière que les étincelles fussent de nouveau au maximum, on trouva que les rayons avaient été déviés d'environ 22°, on a pu calculer ainsi que l'asphalte avait un indice de réfraction égal à 1,7 environ pour ces ondes de 60^{cm}.

190. Ces expériences sont mémorables, et paraissent devoir permettre d'établir définitivement un grand nombre de points douteux. Ainsi, comme on le sait, on a discuté pendant près d'un siècle la question de savoir si les vibrations lumineuses avaient lieu dans le plan de polarisation ou normalement, ou, en d'autres termes, si c'est l'élasticité ou la densité de l'éther qui est variable. Dans la théorie de Maxwell, cela revient à savoir si c'est la perturbation électrostatique ou la perturbation électromagnétique qui a lieu dans ce plan.

Cette question avait été tranchée ou à peu près par la considération d'expériences d'Optique pure, mais en exigeant des efforts d'analyse extraordinaires. Aujourd'hui que nous pouvons produire une radiation électrique en connaissant parfaitement toutes les conditions relatives à la direction de vibration, cette question se résout d'elle-même, et l'on peut espérer qu'on pourra bientôt en dire autant de quelques autres problèmes d'Optique qui étaient depuis longtemps *classés*.

Nous possédons maintenant une véritable théorie ondulatoire de la lumière, qui n'est plus basée sur une analogie avec les phénomènes du son ; sa conception et sa première démonstration expérimentale doivent compter parmi les plus belles découvertes de la fin du XIXe siècle.

En 1865, Maxwell publia sa théorie électromagnétique de la lumière. Avant la fin de 1888, elle était définitivement vérifiée. Son développement complet n'est plus qu'une question de temps et de recherches judicieuses. L'Optique tout entière est maintenant entrée dans le domaine de l'Électricité qui est devenue une science universelle.

FIN.

TABLE DES MATIÈRES.

CHAPITRE V.

CHAPITRE VI.

TROISIÈME PARTIE.

MAGNÉTISME.

CHAPITRE VII.

CHAPITRE VIII.

CHAPITRE IX.

CHAPITRE X.

CHAPITRE XI.

QUATRIÈME PARTIE.

RADIATION.

CHAPITRE XII.

CHAPITRE XIII.

CHAPITRE XIV.

CHAPITRE XV.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

Paris. — Imp. Gauthier-Villars et fils, 55, quai des Grands-Augustins.

Paris. — Imp. Gauthier-Villars et fils, 55, quai des Grands-Augustins.